



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ AL SLITIN POMOCÍ SVAŘOVACÍCH ZDROJŮ SKS WELDING

WELDING OF ALUMINUM ALLOYS WITH USING SKS WELDING EQUIPMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Šaloun

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marian Sigmund, Ph.D.,

IWE

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jan Šaloun**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Marian Sigmund, Ph.D., IWE**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Svařování AL slitin pomocí svařovacích zdrojů SKS welding

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor(ka) se ve své diplomové práci bude zabývat problematikou svařování hliníkových slitin v oblasti automobilového průmyslu s využitím svařovacích procesů společnosti SKS welding. Teoretická část práce uvede obecné rozdělení slitin hliníku s hlubším rozbohem slitin řady 5000 (Al-Mg) a jejich svařitelnosti. Dále zde budou popsány svařovací balíčky SKS welding, včetně detailní charakteristiky procesů, jejich výhod a použití. Praktická část práce bude tvořena výsledky svařovacích experimentů pro přeplátované a koutové svary s ověřením kvality pomocí makrografického rozboru.

Cílem práce je analyzovat dané svařovací procesy a jejich vliv na geometrii a kvalitu svarového spoje.

Cíle diplomové práce:

Literární rešerže svařitelnosti Al slitin v oblasti automotive.
Studie robotizovaného svařování Al slitin zdroji SKS Welding.
Odladění procesu a svaření vzorků přeplátovaných a koutových svarů.
Zhodnocení kvality provedených svarů metalografickým rozbohem.
Porovnání geometrie a kvality svarových spojů.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.

AMBROŽ, Oldřich. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

BARTÁK, Jiří. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.

MALENA, Bohuslav, 1961. Pájení a sváření hliníku. [Praha: Státní nakladatelství technické literatury].

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zaměřuje na robotické MIG svařování hliníkových slitin svařovacími procesy od firmy SKS Welding. Hlavním úkolem bylo odladit svařovací proces pro zhotovení svařence složeného z profilů ze slitiny EN AW-6061 T6 s komplikovaným průřezem spojených dvěma koutovými spoji. S ohledem na omezené množství profilů vyhrazených k odladování bylo chování svařovacích procesů nejdříve testováno na koutových a překládaných spojích plechů tloušťek 3 a 5 mm ze slitiny EN AW-5754 H22 s podobnou svařitelností, jako má slitina profilů. Ke svařování obou slitin bylo možno použít ochranný plyn Argon 4.6 a přídavný drát AlMg5 o průměru 1,2 mm. Odladěné KF-Pulse DP procesy svařování plechů byly použity pro počáteční nastavení parametrů svaření profilů. Následně byly postupně upravovány proměnné, dokud nebyla dosažena přijatelná vizuální a vnitřní kvalita ověřená metalografickými výbrusy řezů v požadovaných místech. Velkým problémem bylo dosažení potřebných průvarů v místech, kde se nacházela žebra. Požadavků bylo dosaženo kombinací různých svařovacích rychlostí, hodnot proudů a rychlostí posuvu drátů. Pórovitost pomohla redukovat speciální funkce Dual Puls.

Klíčová slova

hliníková slitina, EN AW-6061, SKS Welding, robotické svařování, KF-Pulse DP

ABSTRACT

This thesis focuses on robotic MIG welding of aluminum alloys using welding processes from SKS Welding. The main task was to fine-tune the welding process to produce a weldment composed of profiles made of EN AW-6061 T6 alloy with a complicated cross-section connected by two fillet welds. Due to the limited number of profiles reserved for debugging, the welding process behavior was first tested on filled and overlap joints of 3 and 5 mm thick sheets made of EN AW-5754 H22 alloy with similar weldability to the alloy of the profiles. Both alloys could be welded using Argon 4.6 shielding gas and AlMg5 filler wire with a diameter of 1.2 mm. Fine-tuned KF-Pulse DP welding processes of sheets were used to initially set the welding parameters for the profiles. Variables were then gradually adjusted until acceptable visual and internal quality verified by metallographic cuts at the desired locations was achieved. A major challenge was to achieve the necessary penetration in areas where there were ribs. This requirement was achieved through a combination of different welding speeds, current values, and wire feed rates. Pores were reduced using the special Dual Pulse function.

Key words

aluminum alloy, EN-AW-6061, SKS Welding, robotic welding, KF-Pulse DP

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠALOUN, Jan. *Svařování AL slitin pomocí svařovacích zdrojů SKS welding* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145853>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marian Sigmund.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Svařování AL slitin pomocí svařovacích zdrojů SKS welding vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 23. 5. 2023

místo, datum

Jan Šaloun

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Marianu Sigmundovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl vyjádřit své díky společnosti AWL-Techniek CZ, s.r.o. a zejména Ing. Davidu Mikešovi za vstřícný přístup, rady a veškerý čas, který mi věnoval. Nemohu opomenout svoji rodinu a přítelkyni, bez jejichž podpory bych se neobešel.

OBSAH

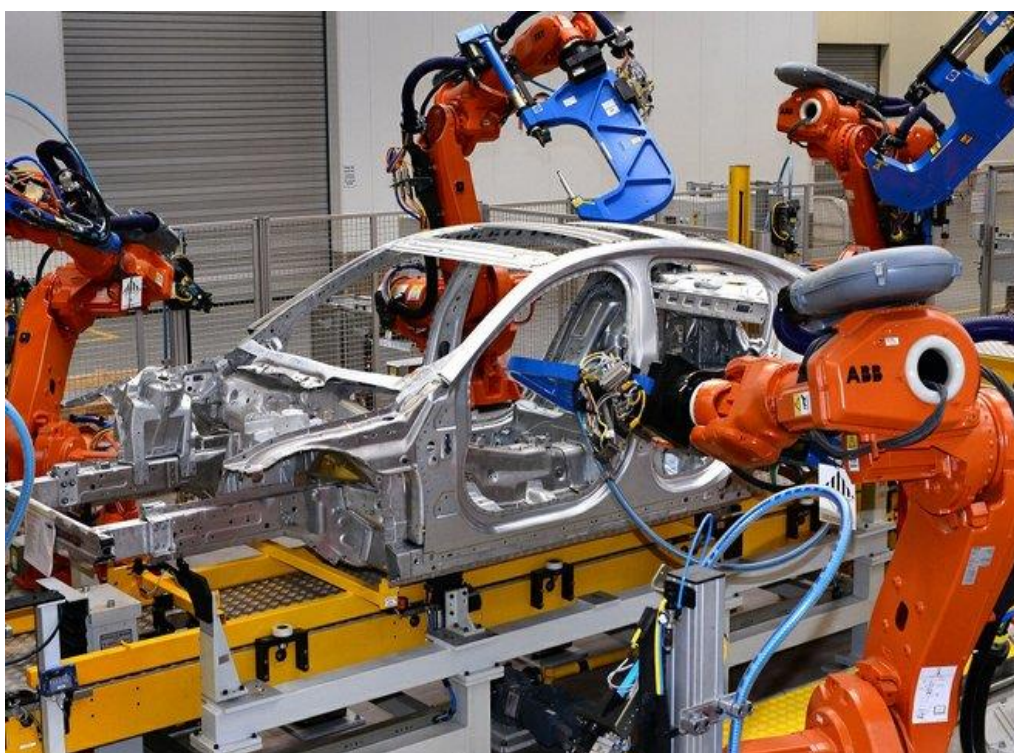
Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
2 SVAŘOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN V AUTOMOTIVE	12
2.1 Al slitiny	12
2.1.1 Význam prvků ve slitinách	13
2.1.2 Zpevňující mechanismy a tepelné zpracování slitin	14
2.1.3 Eloxování slitin	15
2.1.4 Vlastnosti a použití jednotlivých řad slitin v automotive	16
2.1.5 Svařitelnost	20
2.1.6 Metody svařování	22
2.1.7 Hodnocení kvality Al svarů	25
2.2 Elektrický oblouk, svařovací zdroje a procesy	26
2.2.1 Svařovací zdroje	28
2.3 Robotizované MIG svařování	30
2.3.1 Robot ARC Mate 120iD	31
2.3.2 Zařízení pro robotizované svařování společnosti SKS Welding	33
3 ODLAŽOVÁNÍ SVAŘOVACÍCH PROCESŮ	41
3.1 Postup svařování a vyhodnocování	43
3.2 Svařování vzorků	44
3.2.1 Přepřátované svary plechů tloušťky 3 mm	46
3.2.2 Koutové svary plechů tloušťky 3 mm	48
3.3 Svařování součásti bateriového boxu	50
3.3.1 Postup odladění spojů	52
3.3.2 Konečné zhodnocení	58
ZÁVĚR	60

Seznam použitých zdrojů
 Seznam použitých symbolů a zkratek
 Seznam příloh

ÚVOD

Lepení, pájení či nýtování se spolu se svařováním řadí mezi metody tvorby nerozebíratelných spojů. Díky možnosti svařování kovů, plastů i například keramiky můžeme nalézt aplikace dané technologie všude kolem nás. K tvorbě spojů lze využít širokou škálu technik, na jejichž volbě závisí i výsledná kvalita. Při porozumění svařitelnosti materiálů lze vytvářet i spoje dosahující lepších vlastností než základní materiál. V průmyslu má svařování pevnou pozici. Vedle obrábění, tváření a slévání se řadí mezi nejdůležitější výrobní technologie. V dnešní době je kladen stále větší důraz na robotizaci a automatizaci svařovacích procesů s cílem urychlení, zpřesnění a zlevnění výroby. Mezi firmami používajícími robotizované svařování jsou významnými hráči společnosti spadající do automotive odvětví průmyslu. [1; 2; 3]

S ohledem na nutnost splnění čím dál přísnějších emisních limitů je při výrobě automobilů se spalovacím motorem poptávka po co nejnižší spotřebě paliva, které lze dosáhnout úpravou aerodynamiky automobilu či jeho odlehčením. Nahrazením některých původně ocelových či litinových komponent variantami z hliníkových slitin je dosaženo téměř trojnásobného ušetření hmotnosti. V případě menších součástek je rozdíl nepatrný, ovšem použití lehčích slitin například pro odlití bloku motoru snižuje hmotnost výrazně. U elektromobilů je odlehčení také žádané, jelikož díky němu jsou schopny dosáhnout větších dojezdových vzdáleností. [2; 3]

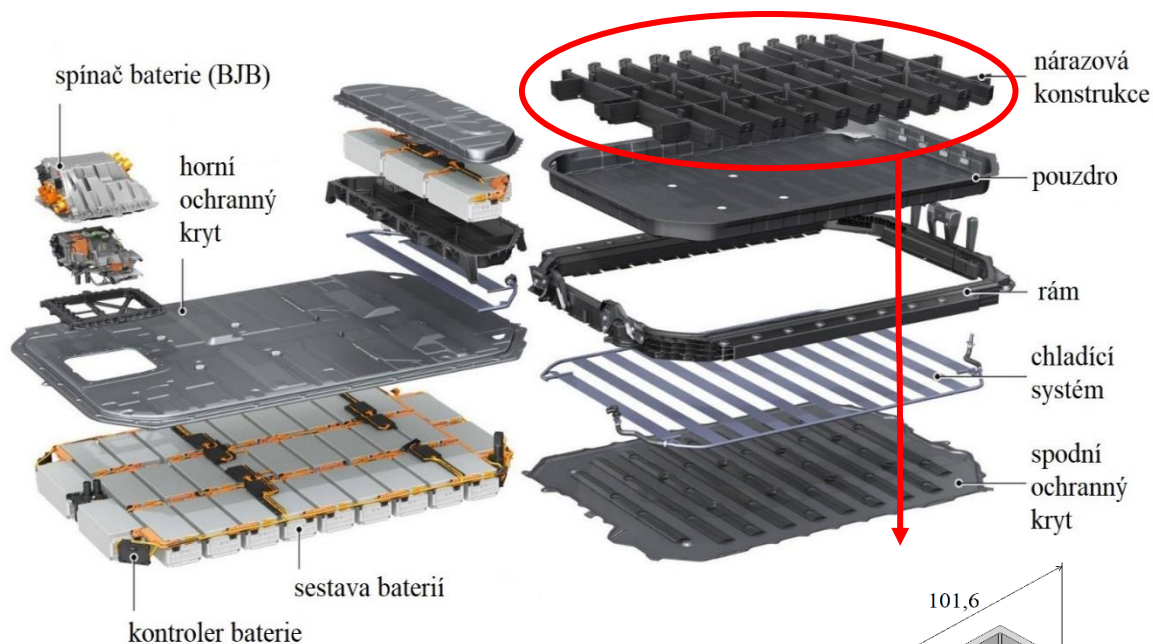


Obr. 1 Robotické svařování automobilové karoserie [4].

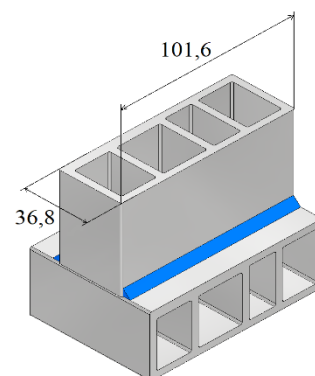
1 ROZBOR ZADÁNÍ

Práce se zabývá odlaďováním parametrů robotického svařovacího procesu dvou koutových spojů pro zhotovení části konstrukce bateriového boxu elektromobilu (obr. 2). Jedná se o svařenec složený z protlačovaných profilů z hliníkové slitiny EN AW-6061 T6, jehož detail je znázorněn na obrázku 3. Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2.

Spoje budou zhotovovány pomocí robotického MIG svařování s použitím svařovací aparatury od firmy SKS Welding. Na trhu se zvyšuje podíl robotických linek svařujících hliníkové slitiny a spolupracující firma AWL-Techniek z Napajedel u Otrokovic má zájem otestovat kvalitu robotického MIG svařování právě s pomocí těchto zdrojů.



Obr. 2 Sestava boxu baterie automobilu [5].



Obr. 3 Detail svařence.

Tab. 1 Chemické složení slitiny EN AW-6061 v procentech [6].

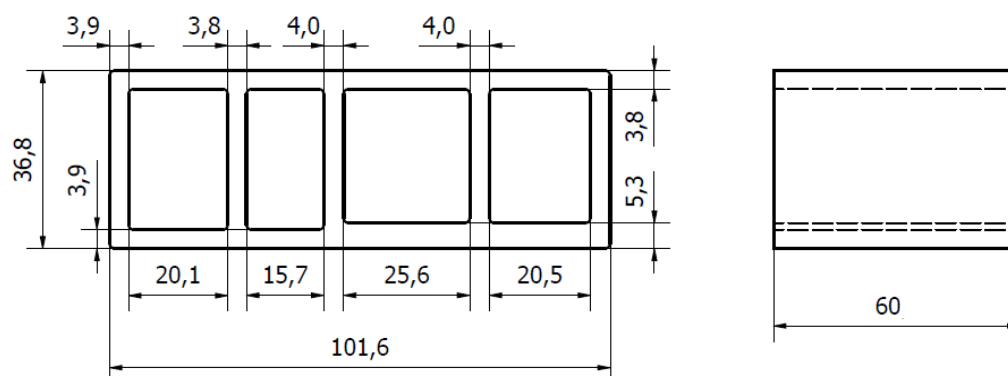
Al	Si	Mn	Cu	Cr	Fe	Mg	Zn	Ti	Ostatní
95,5-97,05	0,4-0,8	0,2-0,7	0,15-0,4	0,8-1,2	0,7	0,15	0,25	0,15	0,15

Tab. 2 Mechanické vlastnosti slitiny EN AW-6061 T6 [7].

t = 3,0-6,0 mm	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅₀ [%]	Tvrdość [HBW]
stav T6	min. 290	min. 240	10	88

S ohledem na účel použití boxu – ochranu baterie a pohlcování nárazů – musí konstrukce zaručovat tuhost – což zajišťuje průřez profilů s proměnlivými tloušťkami stěn a výztužnými žebry, viz obr. 4. V minulosti byly spoje zhotovovány na sestavě podobného typu s pomocí procesů jiných výrobců a i na základě této zkušenosti jsou při svařování očekávány komplikace

s dosažením požadované kvality spojů způsobené nerovnoměrným odvodem tepla kvůli vyskytujícím se žebřím a rozdílným tloušťkám stěn.



Obr. 4 Svařovaný profil s kótami.

Množství profilů vyhrazených pro testování je omezeno, proto procesy budou nejdříve odladěny na plechách slitiny EN AW-5754 H22 tlouštěk 3 a 5 mm. Cílem je zjistit chování SKS svařovacích procesů pro různé kombinace tlouštěk, dosáhnout požadovaných kvalit svarů a následně zvolit vhodný proces a parametry, jež poslouží jako vstupní hodnoty pro svaření profilů. Firma požaduje odladit svařovací parametry koutových svarů s následnou aplikací na zmíněný profil a zároveň odladit parametry pro spoje překlátované.

Plechý pro testování jsou z jiné řady Al slitin než profily – chemické složení a mechanické vlastnosti, viz tabulky 3 a 4. Jejich materiál byl zvolen z několika důvodů. Firma plechy disponuje v dostatečném množství vzhledem k využití pro jiné aplikace, v nichž budou mj. odladěny svařovací parametry spojů využity. Díky podobné svařitelnosti slitin třídy 5xxx a 6xxx jsou parametry aplikovatelné i pro počáteční nastavení svařovacího procesu spojů profilů. Pro obě třídy platí, že jsou dobře tavně svařitelné a pro metodu MIG lze použít stejný přídavný materiál AlMg5 v ochranné atmosféře argonu.

Tab. 3 Chemické složení slitiny EN AW-5754 v procentech [6].

Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Ostatní
94,2-95,2	2,6-3,6	0,4	0,4	0,1	0,5	0,3	0,2	0,15	0,15

Tab. 4 Mechanické vlastnosti slitiny EN AW-5754 [7].

t = 3,0-6,0 mm	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅₀ [%]	Tvrdość [HBW]
stav H22	min. 220	min. 130	11	63

Společnost AWL-Techniek se zabývá mj. výrobou robotických svařovacích buněk, jež jsou tvořeny dle požadavků zákazníka na základě podkladů svařence (skupiny svařenců), který se bude v buňce svařovat. V závislosti na složitosti jeho tvaru a velikosti je buňka osazena jedním či více svařovacími roboty včetně svařovacích zdrojů. Spolu se sestavením buňky zaručuje i provedení svarů v kvalitě dané dle norem zákazníka. [8]

Teoretická část práce bude zaměřena na rozbor hliníkových slitin, jejich rozdělení, použití v automobilovém průmyslu a svařitelnost. Dále bude rozebrána svařovací aparatura pro robotické MIG svařování od firmy SKS Welding, jež bude použita v experimentální části.

2 SVAŘOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN V AUTOMOTIVE

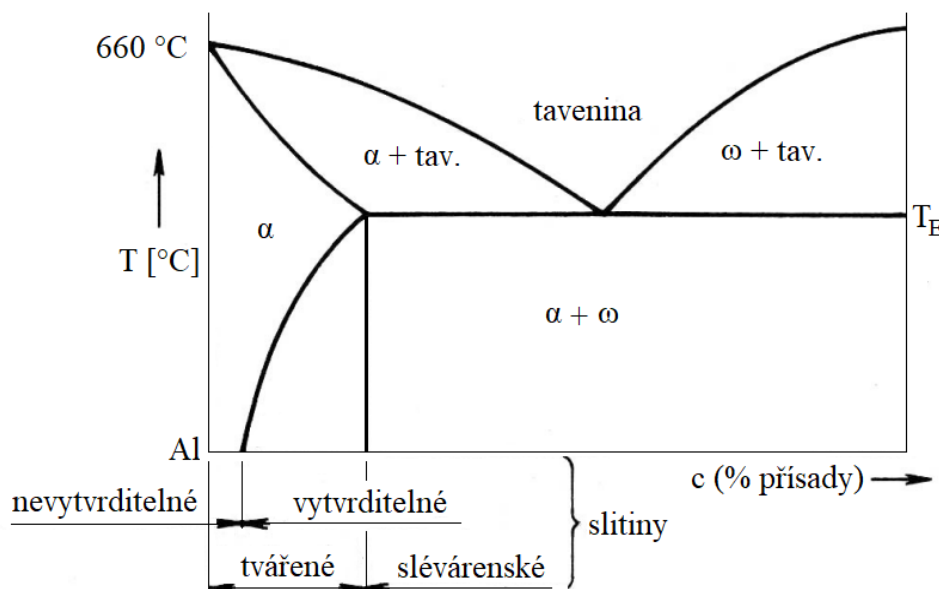
Hliník spolu s jeho slitinami je hojně využíván ve strojírenském průmyslu. Pro spojování součástí je hojně voleno svařování pro svou pevnost a univerzálnost. Aby vznikl svar požadované kvality, je třeba důkladná znalost problematiky svařitelnosti, v níž významnou roli hraje chemické složení slitin a přítomnost oxidické vrstvy na povrchu. Robotizací svařovacích procesů dochází především k jejich zrychlení.

2.1 Al slitiny

Hliník je nepolymorfní kov stříbrné barvy s FCC mřížkou, hojně využívaný díky svým vlastnostem, které jej mnohdy upřednostní k použití namísto ocelí. Jedná se zejména o vysokou tvárnost, tažnost, korozivzdornost, tepelnou vodivost, nemagnetismus či netoxicitu. Kov nachází aplikace napříč odvětvími průmyslu od stavebního, strojírenského po potravinářský a chemický. [9; 10]

V čistém stavu není hliník příliš využíván kvůli špatným mechanickým vlastnostem a slabé odolnosti vůči vnějším vlivům. Nejčastěji je používán ve slitinách, které zvyšují tvrdost, pevnost či odolnost proti únavě, korozi, opotřebení aj. Lze je dělit dle více kritérií. Podle způsobu zpracování na slitiny k odlévání a pro tváření, či dle možnosti vytvrzení, viz rovnovážný diagram na obr. 5. [11; 12]

Hliníkovými slitinami jsou v automobilovém průmyslu hojně nahrazovány především součástky ze slitin železa – ocelí a litin. Jde je porovnávat z hlediska hustoty, magnetických vlastností nebo typu krystalické mřížky, ale jejich mechanické vlastnosti jednoduše porovnat nelze. Ocelí je velké množství, stejně jako hliníkových slitin, přičemž oceli i slitiny hliníku jdou legovat a tepelně či chemicky zpracovávat pro zlepšení vlastností. Platí, že zlepšení jedné z mech. vlastností zároveň může znamenat zhoršení některé jiné. [9; 11; 12]



Obr. 5 Rovnovážný diagram binárních slitin hliníku [11].

Podrobněji jsou dále rozdělovány normami ČSN EN 573-1 a ČSN EN 1780-1 na slitiny k tváření, k odlévání, slitinové ingoty a předslitiny (EN AX, viz tabulka 5). Ingoty a odlitky jsou charakterizovány pětičíslicovým označením, předslitiny a tvářené slitiny složením čtyř číslic. V jejich označeních jsou zásadní první číslice za spojovníkem udávající hlavní legující prvek (tabulka 6). [13; 14]

Tab. 5 Rozdělení slitin dle zpracování.

Označení slitiny	Typ slitiny
EN AB-xxxxx	Slitinové ingoty pro přetavení
EN AC-xxxxx	Slitinové odlitky
EN AM-xxxx	Předslitiny
EN AW-xxxx	Tvářené slitiny

Tab. 6 Třídy Al slitin.

Označení třídy EN AX-XXXX(X)	Hlavní legující prvek
1xxx	Čistý hliník (99 % a více)
2xxx(x)	Měď
3xxx	Mangan
4xxx(x)	Křemík
5xxx(x)	Hořčík
6xxx	Hořčík a křemík
7xxx(x)	Zinek
8xxx	Jiné prvky
9xxx	Neobsazená řada

2.1.1 Význam prvků ve slitinách

Prvky obsažené ve slitinách spolu s hliníkem se dělí na záměrně dodané pro zlepšení vlastností (legury) a tzv. nečistoty, jež se vždy v určitém malém množství (setiny – desetiny hm. %) vyskytují v „čistém hliníku“ (P, S, Si, Li, Mg, Ti, C, V, Fe). Legující prvky lze rozdělit na tzv. hlavní, které jsou obsažené v jednotkách procent (např. Cu, Mn, Mg, Zn, Si), a vedlejší, jež jsou přidávány v desetinách či setinách hm. procent, přičemž už při takto nízkém obsahu zlepšují vybrané vlastnosti. [9; 12]

Níže jsou vypsané vlastnosti slitin spolu s prvky, které je obecně ovlivňují. Pokud prvek má vliv přímo na konkrétní třídu, je tato specifikace zvýrazněna v závorce. Pro přehlednost jsou ve výčtu nahrazena slova „zvýšení“ a „snížení“ symboly ↑, respektive ↓. Je důležité zmínit, že účinek prvku na změnu dané vlastnosti je uvažován v běžné koncentraci. Některé mají při různých koncentracích odlišné chování. Např. hořčík u Al-Mg slitin v koncentraci pod 3 hm. % snižuje tažnost, při koncentraci nad 7 hm. % tažnost naopak podporuje [9]:

- pozitivní ovlivnění:
 - zjemnění zrna: B, Ti, Zr, Fe, Mn,
 - zpomalení růstu zrna: Cr (Al-Mg),
 - ↑ obrobitelnosti: Bi, Sn, Pb, P (nadeutektoidní Al-Si), Cd,
 - ↑ odolnosti proti praskání: Ti, Sb (Al-Mg), Bi (slitiny s Mg), Si (Al-Cu-Mg),
 - ↓ oxidace za zvýšených teplot: Be (slitiny s Mg),
 - ↑ korozní odolnosti: Ni (Al-Si, Al-Cu), Sb (Al-Mg), Sn (Al-Cu), Mg, Cd (slitiny se Zn),
 - ↑ korozní odolnosti proti praskání pod napětím (SCC): Cr, Ag (Al-Zn-Mg),
 - ↑ pevnosti: Sn (Al-Cu), Mg, Cd (slitiny se Zn), Li, Cu, Ca (Al-Si), Zn,

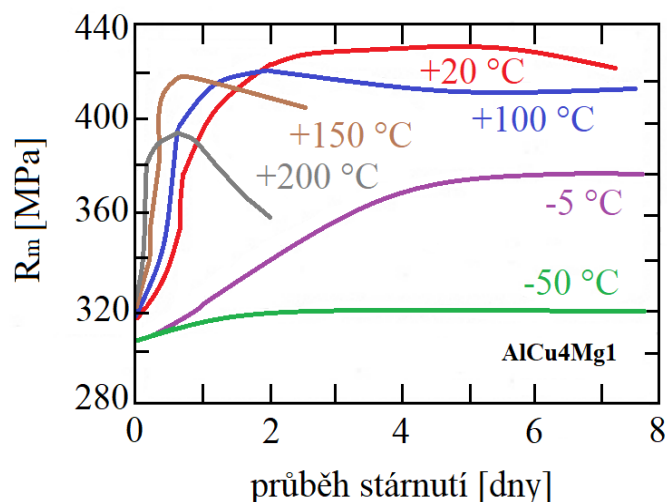
- ↑ pevnosti za vyšších teplot: Ni (Al-Si, Al-Cu), Fe (Al-Cu-Ni),
- ↑ pevnosti při zachování tvařitelnosti: Mn,
- ↑ modulu pružnosti v tahu: Li,
- ↑ tvrdosti: Mg, Si, Cu,
- ↑ tvrdosti za vyšších teplot: Ni (Al-Si, Al-Cu),
- ↑ rekrytalizační teploty: V, Zr, Mn,
- urychlení procesu stárnutí: In (Al-Zn), Cd (slitiny se Zn), Ag, Sn (Al-Cu),
- ↑ tvařitelnosti ve vystárnutém stavu: Si;
- negativní ovlivnění:
 - ↓ odolnosti proti vzniku horkých trhlin: Sn (Al-Cu), Pb (Al-Cu-Mg),
 - zhoršení korozní odolnosti: Cu, Sn,
 - ↑ rizika povrchové důlkové koroze (pitting): C,
 - ↓ schopnosti vytvrzování stárnutím: Ca (Al-Mg-Si),
 - zhoršení tvařitelnosti (↓ tažnosti): Cu, Ca (Al-Si),
 - zhoršení svařitelnosti: Cu,
 - ↑ porozity: H. [9; 12; 15; 16]

2.1.2 Zpevňující mechanismy a tepelné zpracování slitin

Ke zvýšení pevnostních charakteristik slitin může dojít několika způsoby. Deformačním zpevňováním, substitučním zpevňováním mřížky či tepelným zpracováním.

Základním mechanismem je deformační zpevňování, které je pro kovy charakteristické. Ke zvyšování pevnosti dochází při tváření za studena, tedy pod teplotou rekrytalizace ($T_{REK} = 0,4 \cdot T_{TAV}$), kdy vlivem působení zátěžných sil dochází k pohybu dislokací, jejich multiplikaci a hromadění. Stoupá hodnota deformačního odporu materiálu. [12; 17]

Usazením legujícího prvku (Cu, Mn, Si, Mg, Zn) v krystalické mřížce hliníku vzniká binární systém, ve kterém se nachází substituční tuhý roztok α s vyššími mechanickými vlastnostmi, než má čistý hliník. Velikost zpevňujícího efektu je závislá na podílu atomových poloměrů Al a legury či podobnosti krystalické mřížky. S rostoucím rozdílem atomových poloměrů nastává větší zpevňování. [9; 12]



Obr. 6 Vytvrzování slitiny AlCu4Mg1 [11].

U slitin, v nichž se s klesající teplotou snižuje mez rozpustnosti v tuhém roztoku, lze uplatnit precipitační vytvrzení sestávající ze tří fází. V prvním kroku je aplikováno rozpouštěcí žíhání, tedy ohřev a výdrž na teplotě, při které dochází k co největšímu rozpuštění částic v tuhém roztoku. Následuje rychlé ochlazení (zakalení), jehož následkem vzniká přesycený tuhý roztok (tzn. v tuhém roztoku je rozpuštěno větší množství příměsí než při rovnovážném stavu). Posledním krokem je stárnutí, při němž nastává rozpad přesyceného tuhého roztoku za vzniku precipitátů, jejichž uložení v mřížce slitiny brání pohybu dislokací a tím se zvyšuje pevnost a tvrdost. Stárnutí může probíhat za teploty pokojové (tzv. přirozené stárnutí) nebo za zvýšené (umělé stárnutí), přičemž s rostoucí teplotou dochází k urychlení procesu, viz obr. 6. Při překročení předepsané doby výdrže na teplotě stárnutí nastává přestárnutí slitiny, což má za následek snížení pevnosti a tvrdosti. [9; 18]

Žíhání možná k použití u hliníkových slitin jsou kromě výše zmíněného rozpouštěcího i rekrytalizační, s částečnou rekrytalizací, stabilizační, ke snížení pnutí či homogenizační. Stav zpracování hliníkových slitin jsou označovány dle normy ČSN EN 515. Základními označeními jsou:

- H – deformační zpevnění,
- O – žíhání,
- T – precipitační vytvrzování. [9; 19]

Pro přesnější popis stavu lze písmena doplnit číslicemi. Deformační zpevnění (H) může být následováno žíhací operací (určuje 1. číslice HX). Konkrétní stav deformačního zpevnění lze upřesnit druhou a třetí číslicí. Žíhání samotné je rozlišeno do tří kategorií O1-O3. Precipitační vytvrzování je klasifikováno do 10 základních kategorií. T1-T4 značí stavy vystárnuté přirozeně, T5-T10 uměle. Stav T7 označuje přestárnutý stav. [19]

2.1.3 Eloxování slitin

Nejčastěji aplikovanou úpravou povrchu je eloxování neboli anodizace. Proces slouží k zesílení a zrovnoměnění oxidické vrstvy na povrchu za účelem zvýšení odolnosti proti opotřebení a korozi. Dalším důvodem k použití je možnost nasycení povrchu barvivy nebo mazivy. [20]

K dosažení co nejlepších účinků procesu je potřeba, aby součást byla před započítím řádně očištěna od hoblin, prachu, mastnoty aj. Povrch může být zbaven nečistot mechanicky (kartáčováním, broušením, leštěním) či chemicky čistidly. Finální dočištění a redukci oxidické vrstvy zajistí proces moření, který je prováděn v lázni s roztokem hydroxidu sodného za zvýšených teplot. [9; 21]

Samotný proces eloxace probíhá elektrolyticky v lázních. Základní lázeň využívá kyselinu chromovou, pomocí níž je možné vytvořit tenké, tvárné vrstvy oxidu. V současnosti jsou využívány nejčastěji lázně s kyselinou sírovou, které umožňují vytvořit silné vrstvy oxidů (tzv. tvrdé eloxování). [9; 20]

Hliníkový předmět je ponořen do lázně a zapojený jako anoda (+). Průchodem elektrického proudu jsou uvolňovány z elektrolytu záporné ionty kyslíku, které interagují s hliníkovým předmětem a vytváří na povrchu porézní oxidickou vrstvu. [20]

Po nabytí dostatečné vrstvy povlaku je součást vyjmuta z lázně, opláchnuta od zbytků elektrolytu a následuje utěsnění pórů povrchové vrstvy. K tomuto účelu se nejčastěji používá ponoření součásti do demineralizované vodní lázně o teplotě kolem 100 °C na několik minut. Proces je energeticky náročný, stejně jako samotná eloxace. Pro ušetření nákladů byly vyvinuty další způsoby utěsnění pórů, např. těsnění fluoridem nikelnatým či chromátové těsnění. V případě požadavku na obarvení vrstvy je barvivo aplikováno po vyjmutí z elektrolytické lázně před utěsněním pórů. [20; 22]

Při eloxování vzniká oxid stříbřitý, našedlé barvy o tloušťkách 0,2-200 μm podle použité metody. Oxidickou vrstvu lze obarvit mnoha způsoby dle libosti, viz obr. 7. V průmyslu

je široce používáno černé eloxování pro úpravu optických přístrojů, zbraní aj. V automotive jsou využívány vlastnosti otěruvzdornosti a korozivzdornosti, ovšem pro pohledové díly i barva hraje svoji roli. Příklady eloxovaných dílů z Al slitin jsou prvky obložení interiérů, střešní nosiče nebo brzdové třmeny. [9]



Obr. 7 Barevné eloxování [23].

2.1.4 Vlastnosti a použití jednotlivých řad slitin v automotive

Hliníkové slitinové polotovary se dodávají ve formě svitků plechů, ingotů, tyčí, protlačovaných profilů, trubek aj. Plechy jsou využívány na výrobu lisovaných dílů. Oplechování dveří, kapoty, blatníků, střechy a boků automobilu je souhrnně označováno zkratkou ABS (Auto Body Sheets), viz obr. 8. Využívány jsou tloušťky plechů 0,8-1,8 mm. [12; 24]

Slitiny s dobrou slévateľností se využívají pro výrobu bloků motorů, převodových skříní, hlav pístů, ojníc. Jejich použití namísto litiny má mnoho výhod. Lépe odvádí teplo, jsou lehčí a také se dají snadněji opravit z důvodu lepší svařitelnosti hliníku. Nevýhodou je horší obrobiteľnost a menší odolnost vůči opotřebení. [25]

Další možností zpracování slitin je kování, pomocí něhož se vyrábí např. hlavy pístů, ojnice či brzdové třmeny. Protlačováním jsou získávány profily různých průřezů využívané jako nosné prvky karoserie nebo jako části sloužící k pohlcení energie při nárazu. V některých aplikacích může být použit i hydroforming plechů, profilů, případně trubek. [12; 17; 24]

Níže jsou rozebrány vlastnosti jednotlivých tříd hliníkových slitin spolu s příklady použití konkrétních slitin v automotive. Vzhledem k používání mj. anglické literatury se ne ke každé slitině podařilo dohledat její ekvivalent v evropské normě. Slitiny bez označení „EN“ jsou brány dle americké normy ANSI, přiřazené jsou pro přehlednost do „EN“ tříd podle hlavních legujících prvků:

- EN AW-1xxx – jedná se o jedinou řadu, která není legována žádným prvkem. Nelze ji tepelně vytvrzovat. Řadí se sem hliník o čistotě 99 % a více s vysokou tvařitelností, korozivzdorností, tepelnou a elektrickou vodivostí. Například EN AW-1100 se využívá na výrobu izolačních tepelných fólií. EN AW-1350 se používá k tvorbě elektrických vodičů. [12; 26]
- EN AW-2xxx – značí precipitačně vytvrditelnou třídu slitin známou pod označením „dural“, v níž je hlavním legujícím prvkem Cu (1-5 hm. %) a případnou vedlejší legurou Mg (< 2 hm. %). Díky obsahu Cu mají dobrou pevnost v tahu (přes 500 MPa) a při sníženém obsahu legury je zachována i vysoká tvařitelnost. Výskyt mědi ve slitině ovšem přináší několik problémů. Její segregace vede ke špatné svařitelnosti a náchylnosti na nitkovou korozi. Dále jsou slitiny kvůli obsahu mědi špatně odolné proti korozi, obzvláště jsou náchylné na interkrytalickou korozi. Zvýšení odolnosti nastává

se snižujícím se obsahem Cu, též ji lze zlepšit eloxováním nebo u plechů plátováním tenkými fóliemi ze slitin 1xxx či 6xxx. [9; 12; 17]

Slitiny této řady byly mezi prvními, kterými se začaly pro odlehčení nahrazovat ocelové plechy v automobilových karoseriích. Vzhledem k menším účinkům dodatečného vytvrzení během vypalování laku (bake hardening) než u plechů řady 6xxx se pro krytování karoserie nevyužívají. [17]

EN AW-2024 je dobře odolná proti únavě. Používá se na výrobu součástí brzd, pístů, válců či ozubených kol [26]. EN AW-2011 má zvýšenou obrobiteľnosť a je volena ke zhotovení spojovacího materiálu, ozubených kol nebo obložení interiérů automobilů. Dále se v automotive aplikují z této řady např. slitiny 2002, 2008, 2010, 2014, 2017, 2036. Slitiny 2002 a 2036 mají díky nižšímu obsahu Cu oproti 2014 a 2024 lepší tvařitelnost, svařitelnost a odolnost proti Lüdersovým čarám a korozi. [9; 17]



Obr. 8 Oplechování karoserie automobilu [27].

- EN AC-2xxxx – představuje tepelně vytvrditelné odlitky s obsahem Cu 4-6 hm. % a Mg 0,25-0,35 hm. % (výjimečně až 6 hm. %). Některé ze slitin mohou být dolegovány menším množstvím Mn, Cr, příp. Ag. Je u nich hlídáno maximální množství obsaženého Si a Fe, aby netvořily intermetalické částice. Mohou dosáhnout nejvyšších pevností mezi všemi odlévanými Al slitinami. Oproti ostatním mají také nejvyšší pevnost a tvrdost za zvýšených teplot (do 300 °C). Odolnost proti SCC (Stress Corrosion Cracking) je dosažena tepelným vytvrzením, ale obecně je rezistence proti korozi slabší, a proto je nutné ji při náročnějších aplikacích kompenzovat povrchovými úpravami nebo povlaky. Též slévateľnosť slitiny není dobrá. Zástupcem třídy slitin je AlCu4MgTiAg (A201) používaná pro odlévání hlav válců zážehových motorů, pístů, ojníc, vahadel a turbodmychadlových lopatek. [12; 16]
- EN AW-3xxx – je řada slitin legovaných primárně Mn (do 1,5 hm. %) doplněných o menší množství železa a síry. Vyznačují se vysokou odolností proti korozi, nárazům, dobrou svařitelností, tvárností, pevností a obrobiteľnosť. Zpevnění může být dosaženo deformačně. [12; 15]

EN AW-3003 se používá na obložení interiéru, výrobu potrubí, palivových nádrží či chladičů. Dále se z této slitiny produkují ochranné rámy baterií v elektromobilech, u nichž je důležité splnit požadavek tuhosti a pevnosti [15]. EN AW-3004 je volena pro tvorbu chladičů. Plechy ze slitiny EN AW-3105 jsou využívány na podlahy, dveře a blatníky. [12; 26]

- EN AW-4xxx – označuje slitiny legované Si, jež jsou dobře svařitelné a odolné proti opotřebením. Zástupcem je EN AW-4032 použitelná pro kované písty a další součásti motoru. [12; 26]
- EN AC-4xxxx – zahrnuje slévářenské vytvrditelné slitiny na odlitky nazývané siluminy, s hlavní přísadou Si a dalšími legurami Mg, Cu, Ni, Fe. Dobře odolávají korozi, lehce

se odlévají a obrábějí. Využívané jsou zejména v eutektické koncentraci (kolem 11 hm. % Si) pro dobrou zabíhavost. Mechanické vlastnosti lze ovlivnit mimo precipitační vytvrzení i rychlostí ochlazení taveniny, očkovaním a modifikací. Platí, že s rostoucí rychlostí ochlazení hodnoty mechanických vlastností narůstají. Používají se k výrobě tvarově složitých tenkostěnných odlitků – držáků motorů, bloků spalovacích motorů, olejových van, řemenic, pouzder, krytů, disků kol atd. [9; 18]

EN AC-43300 (AlSi9Mg) je pro svou pevnost a odolnost proti korozi využívána ve vlhkých prostředích, například pro odlitky držáků motorů (obr. 9) [28]. Na výrobu disků kol se dříve používala slitina EN AC-44000 (AlSi11), ale byla nahrazena EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3), jež je díky jemnému legování stronciem vytvrditelná do vyšších pevností [29]. Slitiny EN AC-45400 (AlSi5Cu3, 319), EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3, A356) a EN AC-42200 (AlSi7Mg0,6, A357) jsou používány k odlévání bloků motorů a hlav válců (obr. 10) [25].



Obr. 9 Odlitek držáku motoru [28].



Obr. 10 Blok motoru [25].

- EN AW-5xxx – představuje slitinovou řadu s hlavním legujícím prvkem Mg, případně doplněnou menší příměsí Mn (<1 hm. %) pro větší zpevnění. Jedná se o třídu, která je dobře svařitelná, korozně odolná a tvářitelná. Precipitačně se nevytvřují, pevnost se zvyšuje deformací. Mez pevnosti v žíhaném stavu je 140-200 MPa, deformací ji lze zvýšit až na hodnotu cca 420 MPa. Pro zlepšení tažnosti může být na úkor pevnosti aplikováno žíhání. [15]

Slitiny obsahují max. 6 hm. % Mg, jelikož při vyšším obsahu jsou náchylné na korozi po hranicích zrn kvůli segregaci Al_3Mg_2 [9]. Pro slitiny s obsahem Mg > 3,5 hm. % platí, že by se neměly pro zamezení korozního praskání pod napětím vystavovat provozním teplotám vyšším než 65 °C [12]. Při obsahu Mg přibližně 1,5 hm. % jsou slitiny nejvíce náchylné na vznik horkých trhlin [30]. Z podmínek plyne, že se používají slitiny mezi 1,5-6 hm. % Mg. [11]

Slitiny se aplikují pro výrobu dílů, které nejsou pohledové, protože při jejich tažení vznikají vlivem nahromadění dislokací Lüdersovy čáry, jež nejsou vzhledově přijatelné. Vizuální nekvalitu povrchu lze zlepšit vhodnou povrchovou úpravou. [17]

Například EN AW-5005 je vhodná na oplechování karoserie, výrobu nádrží či potrubí. EN AW-5052 lze využít pro zhotovení palivových nádrží, obložení motorového prostoru, systémů odpružení a oplechování karoserie. EN AW-5056, 5083, 5086, 5182, 5251 jsou používány na oplechování karoserie [12; 24; 26]. EN AW-5454 lze použít k výrobě disků kol [31]. Slitiny EN AW-5252 a EN AW-5457 jsou aplikovány na pohledové díly v interiéru automobilu pro jejich dobrou eloxovatelnost [12]. EN AW-5754 je využívána pro výrobu krytů pod motory (engine bottom guard plates), oplechování střech, dveří či výrobu palivových nádrží. [15]

- EN AC-5xxxx – zahrnuje odlitky legované hořčíkem mající stejné vlastnosti jako tvářené slitiny ze stejné řady. Výborná korozní odolnost je předurčuje k aplikaci v lodním průmyslu. [12]
- EN AW-6xxx – označuje slitiny legované Mg a Si, jejichž obsah je dohromady mezi 1-2 hm. %. Patří mezi tepelně vytvrditelné řady. Precipitační zpevnění je umožněné díky výskytu intermetalické fáze Mg₂Si. Jsou dobře tvařitelné, svařitelné, protlačitelné, odolávají korozi a dají se povrchově upravit do požadovaného vzhledu. U některých zástupců se přidává Cu (< 1 hm. %) pro zvýšení pevnosti. Po vytvrzení dosahuje hodnota R_m až 350 MPa [11]. [9; 17]

V automotive se tato řada uplatňuje pro výrobu protlačovaných konstrukčních profilů vzhledem k výborné protlačitelnosti (extrudability). Ta je způsobena nízkým procentem rozpuštěných látek a vysokým bodem tání. Dále jsou z plechových polotovaru lisovány součásti karoserie, které při umělém stárnutí dosahují dobrého poměru tažnosti ku pevnosti. Navýšit mez kluzu o 50-100 MPa lze během krátkodobého ohřátí (20-30 min) na 180 °C při procesu „paint bake hardening“. [15; 17]

Slitiny EN AW-6014, 6016, 6022, 6181 jsou využity pro venkovní opláštění automobilu (ABS). Díky vysoké pevnosti jsou odolné proti promáčknutí. EN AW-6111 je aplikována na pevnostní díly s pevností 300-350 MPa, například A, B sloupky, zpevňující profily či pro plechy kapoty [24]. Protlačované a hydroformované díly z EN AW-6061, 6082 jsou využívány jako nosné prvky karoserie, k výrobě rámu sedaček a disků kol [15]. EN AW-6151 je volena pro výkovky. [12; 17; 26]

- EN AW-7xxx – představuje řadu legovanou Zn (1-8 hm. %), Mg (1-3 hm. %), příp. Cu (< 2 hm. %) či menším množstvím Cr. Do některých slitin této řady je přidáván Zr (0,1-0,2 hm. %) pro zjemnění zrna, zvýšení rekrystalizační teploty a snížení náchylnosti k praskání [32]. Po precipitačním vytvrzení (stav T6) pevnost v tahu dosahuje hodnoty až 600 MPa. Kvůli obsahu Cu jsou obtížně svařitelné [17]. Jsou dobře korozně a oxidačně odolné, ale zároveň i náchylné k praskání pod napětím a mají nízkou lomovou houževnatost [15]. Proto mohou být používány ve stavu záměrně přestárlém (T7), který sice snižuje pevnost, ale zároveň snižuje náchylnost k SCC a zvyšuje lomovou houževnatost. Použití je omezeno obtížnou tvařitelností za pokojových teplot, proto se musí tvářet za zvýšených teplot. [9; 12]

V automobilovém průmyslu se stejně jako slitiny řady 6xxx používají pro výrobu protlačovaných profilů, ovšem jejich protlačování je pomalejší, protože obsahují větší procento rozpuštěných látek a v procesu je potřeba vynaložit větší sílu. Používají se například jako nárazové konstrukce pro pohlcení deformační energie. [17]

Slitiny EN AW-7003, 7005, 7046, 7178 aj. jsou využívány ve formě protlačovaných nosníků a rámu pro vyztužení karoserie [17; 26]. Ze slitiny EN AW-7075 se ve stavu T6 za tepla lisují B sloupky s R_m přes 500 MPa [33]. Dále je využívána k výrobě A sloupek a jiných držáků, nosníků a profilů karoserie [15].

- EN AC-7xxxx – zahrnuje tepelně vytvrditelné odlitky s dobrou odolností vůči korozi a náchylností na vznik horkých trhlin. Jsou snadno povrchově upravitelné a také schopné vytvrzení přirozeným stárnutím. V automotive se nevyužívají. [12]
- EN AW-8xxx – je třída legována převážně Li, Sn, Fe či Ni. Některé slitiny se dají zpevňovat pouze deformačně (např. Al-Fe-Ni), jiné zvyšují pevnost precipitačním vytvrzováním (Al-Li-Cu-Mg). Výhodou oproti ostatním slitinám je nižší hmotnost a zvýšený modul pružnosti v tahu při zachování dobré pevnosti [11]. Aplikují se zejména v letectví a aerospace. [12]
- EN AC-8xxxx – zahrnuje slitiny k odlévání, z nichž se zhotovují např. ložiska či jejich části do klikových skříní motorů, jelikož obsahují cín, který dodává materiálu lubrikační vlastnosti. Příklady jsou slitiny Al-Sn nebo Al-Sn-Si. [12; 34]

- EN AW-9xxx – jedná se o prozatím neobsazenou třídu slitin, která je v normě ČSN EN 573-1 připravena pro případné obsazení v budoucnu. [13]

2.1.5 Svařitelnost

Svařitelnost materiálu je charakteristika, která udává, zda je materiál vhodný pro vytvoření spoje požadovaných vlastností za daných konstrukčních, technologických a materiálových vlivů. Mezi konstrukční faktory patří např. tloušťka, počet a typ použitých svarů na konstrukci, materiálovými jsou chemické složení, mikrostruktura či náchylnost na vznik trhlin a mezi technologické činitele patří použitá metoda svařování, množství vneseného tepla, volba přídavných materiálů, teploty interpas, předehřevu, dohřevu, tepelné zpracování aj. [30]

Svařitelnost hliníku a jeho slitin ovlivňuje řada společných znaků. Většina legujících prvků má v hliníku omezenou rozpustnost snižující se s klesající teplotou. V kapitole je také podrobněji rozebrána svařitelnost tříd 5xxx a 6xxx, jež jsou použity v praktické části práce. Při svařování tavnými metodami se vyskytuje několik zásadních problémů:

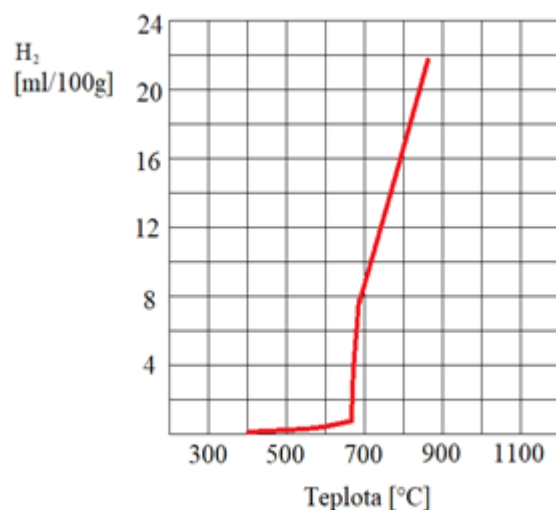
- Vrstva oxidu hlinitého (Al_2O_3) – na povrchu hliníku a jeho slitin je nevodivá, což způsobuje problém se zapalováním oblouku. Je vhodné ji před svařováním narušit či zredukovat její tloušťku. Chemickým mořením je tloušťka vrstvy snížena a zrovnoměněna. Mechanickým očištěním kartáči či broušením není dosaženo takové rovnoměrnosti jako u moření, ale jedná se o rychlejší metodu. Nikdy nedojde k trvalé eliminaci vrstvy, protože oxidy jsou v atmosférickém prostředí vytvářeny na povrchu neustále. Tloušťka přírodní vrstvy se pohybuje v jednotkách až desítkách nm a s časem roste. [30; 35]

Při svařování je potřeba vnést dostatek tepla k rozrušení vrstvy a pro dosažení požadovaného průvaru. Pokud není vrstva v celé délce budoucího spoje stejně široká, svařovací proces není stálý a nemusí být zajištěno dostatečné provaření materiálu. Proto je vhodné jej před svařením skladovat v ustálených podmínkách (prostředí, doba skladování). K odstranění oxidů během samotného svařování se využívá tzv. čistícího účinku argonu. [30; 35]

- Náchylnost na porozitu – představuje problém, jenž vzniká kvůli nutnosti dodání velkého množství tepla materiálu, aby mohly být rozrušeny vysokotavitelné oxidy. Při vyšších teplotách nastává výrazná rozpustnost vodíku ve svarové lázni. Při jejím rychlém tuhnutí nestihne všechen vodík uniknout ze svarového kovu, a zůstává zablokovan v materiálu. Vlivem strmě klesající rozpustnosti v hliníku, viz obr. 11, se všechen plyn nerozpustí do slitiny, jeho přebytečné množství vytváří bubliny, póry či studené trhliny. [30; 36]

Eliminovat přítomnost vodíku ve svarovém kovu lze několika způsoby. Použitím ochranného plynu vysoké čistoty je zamezen přístup atmosféry ke svarové lázni. Další možností je zbavení svarových ploch vlhkosti, mastnoty, jiných nečistot a oxidické vrstvy před samotným svařováním. Zvolením vhodné svařovací metody dojde k rychlému natavení materiálu, aniž by došlo k přehřátí kovu a tedy ke zvýšení náchylnosti ke tvorbě vad. [9; 30]

- Horké trhliny – vznikají v TOO či SK v důsledku napětí vyvolaného vlivem nedostatku eutektické fáze pro vyplnění prostoru mezi rostoucími dendrity během krystalizace. Jednotlivé typy slitin mají rozdílnou náchylnost na vznik trhlin, jelikož mají rozdílné podmínky krystalizace. Riziko jejich výskytu roste se zvyšujícím se časovým intervalem mezi okamžikem, kdy se do sebe začnou zaplézat dendrity krystalů, po čas, kdy je překročena křivka solidu [32]. Nejnáchylnější na vznik horkých trhlin jsou tepelně zpracovatelné slitiny řady 2xxx (Al-Cu-Mg), 6xxx (Al-Mg-Si) a 7xxx (Al-Zn-Mg). Pro slitiny je dáno kritické množství legujícího prvku, kdy je náchylnost nejvyšší. Po překročení kritické koncentrace náchylnost na vznik trhlin klesá (obr. 12). [12; 30]

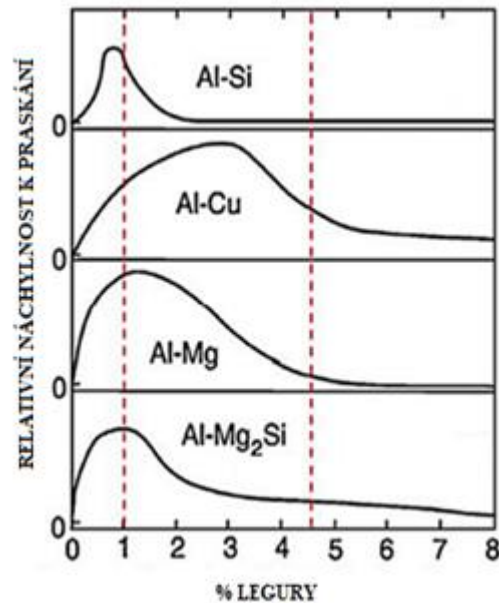


Obr. 11 Rozpustnost vodíku v hliníku v závislosti na teplotě [30].

Pro zamezení vzniku horkých trhlin je potřeba, aby při finálním stádiu krystalizace bylo přítomno 15-25 % objemu tekuté eutektické fáze. Eutektikum lze zajistit ve svaru zvolením vhodného přídavného materiálu (PM) o podobném chemickém složení jako základní materiál. Přídavným materiálem je možné ovlivnit svarový kov tak, aby se v jeho výsledné struktuře vyskytovalo větší množství legur, než je hraniční způsobující vysokou náchylnost k praskání, viz obr. 12. Nejčastěji jsou používány PM s vyššími obsahy Mg či Si, které mohou být legovány menším množstvím Ti či Zr pro zjemnění zrna a tím také přispět ke snížení praskavosti. Při svařování slitin s různým chemickým složením (z různých tříd) není svařitelnost zaručena. Ke snížení rizika vzniku horkých trhlin je možno dále materiál předežhřát, případně použít technologii svařování umožňující velké svařovací rychlosti nebo nesvařovat při příliš pevném upnutí svarových spojů. [30; 32; 37]

- Studené trhliny – vznikají u některých slitin, zejména u řad 2xxx (Al-Cu-Mg) a 7xxx (Al-Zn-Mg), v TOO při teplotách mezi 200-400 °C. Děje se tak z důvodu snížení pevnosti při zvýšených teplotách a nízké tažnosti slitin. [30]
- Přestárnutí tepelně vytvrditelných slitin – je dosud nevyřešený problém nastávající při jejich svařování. Během procesu je materiál ohřátý na teplotu tavení, která je vyšší než teplota stability těchto slitin (max. 200 °C). Přehřátím dochází ke snižování pevnosti a tvrdosti, přičemž intenzita poklesu je dána množstvím vneseného tepla, tedy vzdáleností místa od samotného svaru. Nejvyšší pokles nastává v TOO, kde jsou hodnoty tvrdosti a pevnosti srovnatelné se stavem slitin po žíhání. Pro eliminaci problému je možné provést po svařování dodatečně TZ spoje. Následkům lze předejít již při procesu svařování volbou svařovací metody s vysokou rychlostí ochlazení či takovou, která má pracovní teploty nižší než 200 °C. [30; 38]

Svařitelnost slitin tříd 5xxx a 6xxx, které jsou použity v experimentální části práce, je podobná. Slitiny jsou dobře tavně svařitelné za použití vhodných PM. V automotive jsou často používány ve formě plechů a spojovány odporově (bodově, švově). Pro snížení rizika praskavosti při obloukovém svařování je třeba zvýšit procento Mg; u slitin 6xxx lze účinku dosáhnout také dolegováním Si. Doporučeným PM je AlMg5, pro žíhané slitiny řady 6xxx lze použít i AlSi5 [30]. Rozdíl mezi materiály spočívá v potřebě dodatečného TZ po svařování slitin s obsahem křemíku a hořčíku, protože dochází k přestárnutí spoje, a tím ke snížení jeho mechanických vlastností. [15; 32; 39].

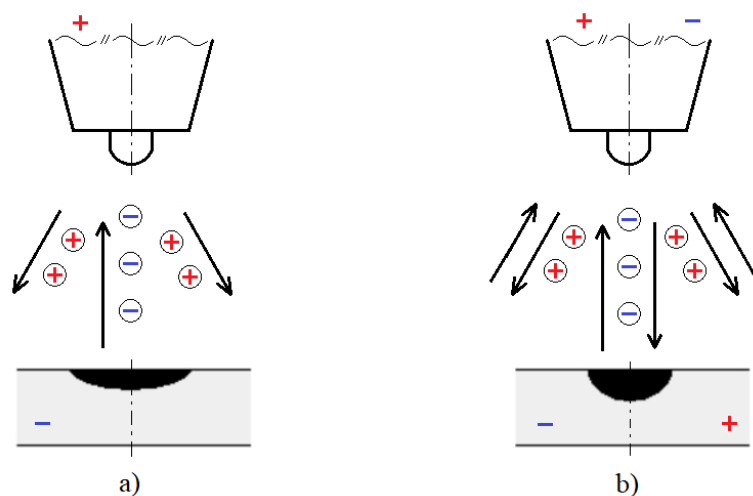


Obr. 12 Náchylnost na vznik trhlin ve slitinách [32].

2.1.6 Metody svařování

Pro spojení hliníkových slitin lze využít velkého množství svařovacích metod, například svařování plamenem, elektrickým obloukem (MIG, TIG, MMA), elektronovým paprskem, laserem, plazmou, elektrickým odporem či metodou FSW, difúzně, tlakem za studena, ultrazvukem. Každá z metod má svá pozitiva a limity, které určují oblast použití. Vzhledem k tématu práce budou v této kapitole rozbrány metody, které lze robotizovat. Řadí se mezi ně TIG a MIG, odporové svařování, FSW, svařování laserem či různé hybridní metody: [9; 30]

- Svařování netavící se elektrodou v inertním plynu (TIG) – využívá tepla elektrického oblouku hořícího mezi špičkou wolframové elektrody a základním materiálem. Použitím střídavého proudu se periodicky mění polarita elektrod, viz obr. 13 b). Ve fázi, kdy je elektroda kladně nabitá (nepřímá polarita), se na záporně nabitém základním materiálu tvoří katodová skvrna, jež se pohybuje po povrchu v místech s největší tloušťkou vrstvy, kde je nejnižší emisní energie. Vlivem vysoké energie skvrny jsou oxidy odpařovány. Jev se nazývá čisticí účinek. Při následném úseku se záporně připojenou elektrodou (přímé polaritě) je teplotně více zatěžován materiál, dochází k jeho tavení a elektroda je chlazená. [30; 40]



Obr. 13 Polarita elektrod při svařování [40].

Střídavým proudem se svařují plechy tloušťek 1-10 mm. Pro ochranu svarové lázně se využívá výhradně argon. Výjimkou je svařování tenkých plechů, kdy lze použít stejnosměrný proud s ochrannou atmosférou hélia. Pro spojování je využíváno pulzních režimů, aby bylo lépe korigováno množství vneseného tepla. Přídavný materiál je podáván ve formě kusových drátů různých průměrů z materiálu voleného podle chemického složení základního materiálu. Svařování touto metodou je pomalejší oproti MIG metodě, ovšem zaručuje vyšší kvalitu svarů a lepší vzhled. Používá se zejména k výrobě pohledových svarů menších rozměrů. Při automatizaci procesu je drátový PM odvíjen z cívky a přiváděn ze strany k elektrodě. [30; 41]

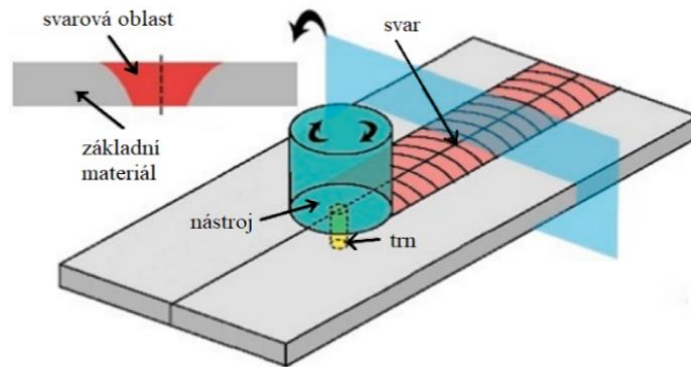
- Svařování tavící se elektrodou s inertní atmosférou (MIG) – je nejběžněji volenou metodou. Oblouk hoří mezi drátovou elektrodou (špičkou průvlastku) a základním materiálem. Svařováno je stejnosměrným proudem s nepřímou polaritou zapojení, aby bylo možné využít čistícího účinku, viz obr. 13 a), a využívá se pulzních režimů pro omezení vneseného tepla. Běžně je používán jako ochranný plyn argon, pro větší tloušťky se přimíchává helium. Lze svařovat plechy od jednotek po desítky mm. Drátová elektroda je dodávána ve formě cívky v různých průměrech dle požadovaného svařovacího výkonu a chemického složení v závislosti na základním materiálu. Výhodou metody je vysoká rychlost svařování oproti použití TIG a snadná automatizace. [30; 42]

Pro MIG i TIG platí nutnost použití ochranné atmosféry. Nejčastěji jsou používány inertní plyny argon a helium, jimiž je nejenom chráněna lázeň, ale také dokáží ovlivnit tvar svaru. Argon je levnější než helium a také má nižší ionizační potenciál, což usnadňuje zapálení oblouku, proto se používá častěji, v čistotě min. 99,9 hm. % Ar. Helium je v některých případech přidáváno do směsi v množství až 75 hm. %, protože lépe vede teplo a tím je dosahováno větších průvarů a šířek svarů. [30; 37; 43; 44]

- Spojování elektrickým odporem – využívá účinku odporového tepla vnikajícího do materiálu stlačeného mezi elektrodami svářečky. Jeho množství je ovlivněno velikostí procházejícího proudu, odporem materiálu a dobou přitlaku. Běžně se aplikuje tzv. tvrdý režim, při kterém je nastavena vysoká hodnota proudu a malý čas stlačení (max. 0,1 s), díky čemuž vnesené teplo neovlivňuje okolí svaru a zároveň nedochází k tak výraznému opotřebení povrchu elektrod. Pro vyšší životnost jsou chlazeny vodou a používají se vyměnitelné ochranné čepičky. [30, 45]

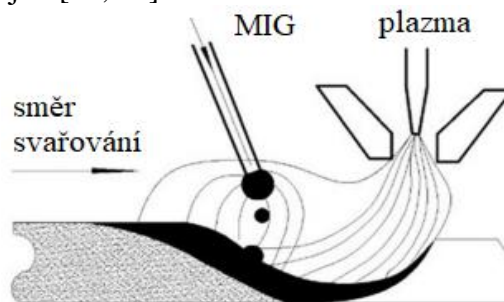
Metoda se v automotive hojně využívá pro automatizované bodové spojování (spot welding) plechů z Al slitin menších tloušťek (0,5-3 mm) zejména pro rychlost procesu. Díky rychlému ochlazení svaru je vhodná pro svařování tepelně vytvrditelných slitin. Oproti bodovému svařování ocelových plechů má pro aplikaci na hliníkové slitiny několik nevýhod. Jelikož tyto slitiny mají vyšší tepelnou vodivost než ocel, je nutné použít více jak dvojnásobně vyšší proudy, následkem čehož jsou rychleji opotřebovány elektrody. Dále u tenkých plechů hrozí propálení a také se zvyšující se hodnotou proudů klesá kvůli rozstříku kvalita povrchu svaru. Přítomnost oxidické vrstvy na povrchu plechů iniciuje vysoký odpor a je dalším důvodem horší jakosti svarů, proto je vhodné ji před svařováním odstranit či alespoň narušit, snížit její tloušťku. Použití bodového svařování pro spojování plechů je přes všechny výhody pro vysokou produktivitu stále voleno. [45; 46; 47]

- Friction stir welding (FSW) – je metoda, při níž jsou materiály spojovány speciálním trnem, který koná rotační pohyb kolem své osy a translačně se pohybuje po rozhraní dvou polotovarů upnutých vůči němu v kolmé poloze. Nejznámější variantou metody je použití jednoho trnu (viz obr. 14), ale pro modifikaci tvaru výsledného svaru lze použít například dva trny zároveň v tandemu, měnit směr jejich rotace aj. Otáčením nástroje kolem osy je rozrušována struktura materiálů a dochází k mísení slitin usnadněnému díky jejich zplastizování teplem získaným třením. Teplota tavení materiálů není dosažena. Použití FSW je vhodné například ke svaření těžko obloukově svařitelných slitin s obsahem Cu, případně pro spojování hliníkových slitin s ocelmi či slitinami titanu a hořčíku. [37; 48]



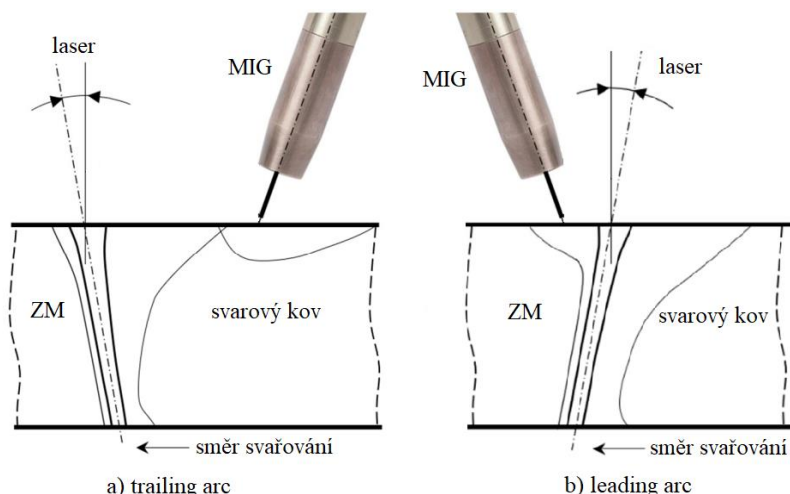
Obr. 14 Metoda svařování FSW [48].

- Svařování laserem – se aplikuje pro schopnost svařování pomocí tzv. keyhole, díky níž vzniká pouze malá TOO materiálu. Dalšími přednostmi je dosažení vyšších rychlostí svařování a lepší kvalita svarů. Nevýhodou představuje vysoká pořizovací cena zařízení. Používány jsou zejména pevnolátkové místo CO₂ laserů, protože jejich paprsky mají menší vlnovou délku, již materiál lépe absorbuje. Oproti ocelím je svařování hliníkových slitin problematictější, jelikož mají nižší absorpci záření. Kvůli vysoké odrazivosti musí být dodáváno více energie a pro dostatečnou kvalitu svarů je nutné před svařováním odstranit oxidickou vrstvu. Proces musí mít správně nastavené parametry (energii paprsku, rychlost pohybu hlavy), aby nedocházelo k přehřátí místa svaru, odtavování legur, výskytu porozity či zbytkového napětí, které by mohlo způsobit trhliny. Výskyt vad, především pórovitosti, lze snížit použitím laseru s dvojitým paprskem. První paprsek má nižší energii, přehřívá materiál. Druhý provádí samotné svaření. [47; 49; 50]
- Hybridní spojování – označuje svařování pomocí více metod spojených do jednoho celku. Každá z nich přináší vlastnosti, jejichž spojením vzniká svar s lepšími vlastnostmi. Hybridní spojování je robotizováno, využívají se především dvě metody. [51; 52]
Plasma-MIG kombinuje schopnost dosažení větší hloubky průvaru (plazma) s rychlým vyplňováním svarové lázně kovem (MIG). Umožňuje svařování slitin středních tloušťek (5-12 mm) vyššími rychlostmi, s nižší spotřebou přídavného drátu a zanechává ve svaru menší zbytková napětí. Plazmový a MIG hořák mohou být vedeny koaxiálně či paraxiálně, jak je znázorněno na obr. 15. Plasma-MIG je oproti jiným hybridním metodám, v nichž je použito laseru, levnější. [51; 52]



Obr. 15 Paraxiální vedení Plasma-MIG [52].

Laser-MIG lze aplikovat v paraxiálním provedení. Dle požadavků může laser předcházet elektrický oblouk (trailing arc) nebo může být pořadí opačné (leading arc), viz obr. 16. Metoda má podobná pozitiva jako Plasma-MIG, navíc díky kombinaci oblouku s laserem je prodloužena doba chlazení lázně, čímž se snižuje riziko praskání. V případě použití leading arc nastavení je využití laserového paprsku efektivnější. Při nepřímém zapojení elektrody je dosaženo vyšší kvality svaru, pokud je použito trailing arc. Nevýhodami jsou vyšší pořizovací cena a složitost nastavení a odladění parametrů. [50]



Obr. 16 Možnosti paraxiálního provedení Laser-MIG svařování [50].

2.1.7 Hodnocení kvality Al svarů

Kvalitou svarů hliníku a jeho slitin zhotovených obloukovými metodami se zabývá mezinárodní norma ČSN EN ISO 10042. Uvádí seznam možných vad, které lze ve svaru nalézt, a definuje jejich maximální přípustné velikosti či množství v závislosti na požadované kvalitě. Jakost spoje je předepsána v technické dokumentaci ve třech úrovních kvality – B, C, D, přičemž stupeň B je nejpřísněji hodnocený, požadavky na kvalitu D jsou nejmírnější. [53]

Norma rozděluje vady na vnější a vnitřní. Vnější jsou hodnotitelné bez nutnosti svar rozřezat, ovšem pro ověření výskytu, množství a velikosti vnitřních nedokonalostí je potřeba provést řez. Mezi vnější vady se řadí povrchové trhliny, póry, koncové staženiny, přílišný rozstřík či vady geometrie svaru. Vnitřními nedokonalostmi jsou trhliny, porozita či nedostatečný průvar. S ohledem na komplikace s pórovitostí se této problematice norma pečlivě věnuje. Je důležité zmínit, že nelze vytvořit svarový spoj bez vad, proto jsou také u svarů s nejvyšší požadovanou kvalitou povolené určité odchylky od ideálního stavu. [53]

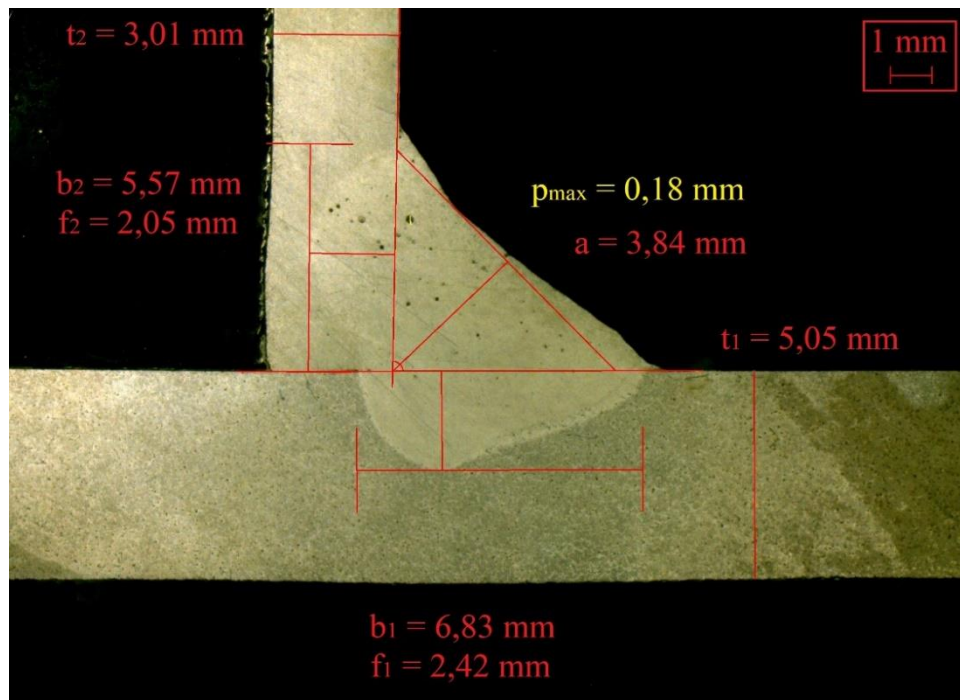
Hodnocení kvality svarů může provádět pouze řádně proškolená obsluha s platnými certifikacemi, které zaručují, že proces hodnocení bude proveden dle platných norem. Samotný proces zkoušení i vyhodnocování je náročný a musí se striktně držet pravidel daných příslušnými normami. [54]

Na základě požadovaného stupně kvality jsou zvoleny potřebné nedestruktivní metody (NDT) či destruktivní metody (DT) pro řádné posouzení svaru. NDT využívají fyzikálních zákonitostí pro detekování a posouzení vad či jejich indikací. Aplikace rentgenového záření, ultrazvuku, kapilární elevace aj. jsou rychlé, efektivní a nenarušují funkčnost – svary mohou být po testování nadále využity. Nedestruktivní metody jsou pro posouzení svarů voleny dle normy ČSN EN ISO 17635. K hodnocení povrchových vad hliníkových svarů slouží vizuální testování v kombinaci s penetrační zkouškou či vířivými proudy. Vnitřní vady jsou hodnoceny v závislosti na tloušťce spoje pomocí rentgenu či ultrazvuku. [55]

DT metody jsou používány především pro hodnocení mechanických vlastností svarového spoje (tvrdost, vrubová houževnatost, lámavost aj.). Kvůli zkouškám jsou svarové spoje zničeny. Do této skupiny se řadí také zkoušky metalografické posuzující kvalitu svaru na základě mikrostruktury a makrostruktury. [54]

Makroskopická zkouška je prováděna při zvětšení maximálně 50x. S její pomocí lze posuzovat výskyt trhlín, dutin, neprůvarů a kvalitu geometrie. Pokud je provedeno správné naleptání vzorků, lze hodnotit i TOO a jednotlivé svarové housenky. Pro leptání hliníkových svarů

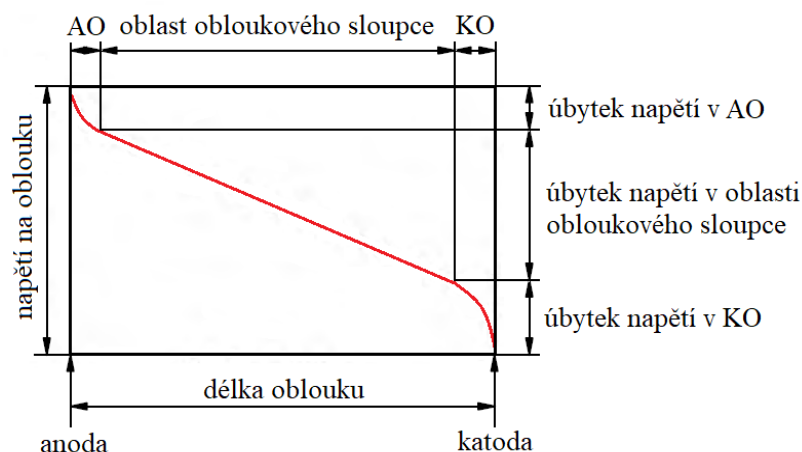
se používá např. roztok hydroxidu sodného. Na obrázku 17 je zobrazen příklad okótovaného metalografického výbrusu vzorku koutového svaru. [56]



Obr. 17 Metalografický výbrus vzorku.

2.2 Elektrický oblouk, svařovací zdroje a procesy

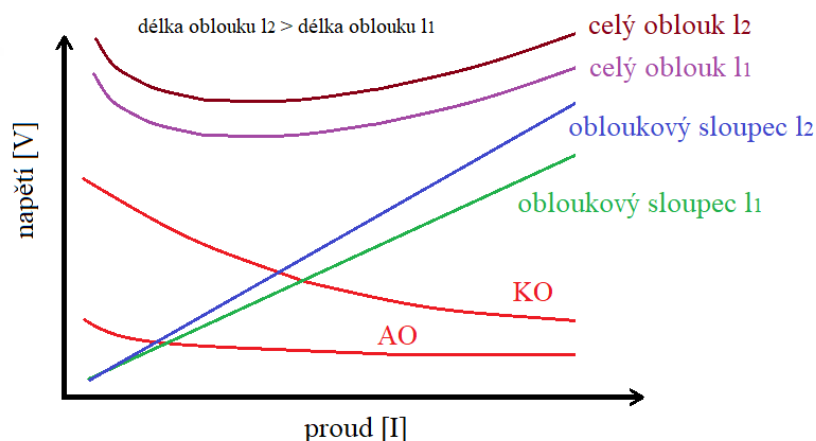
Pro svařování je nezbytné vytvořit elektrický oblouk, který bude mezi elektrodou a materiálem hořet stabilně po celou dobu procesu. Obloukem je z hlediska svařování rozuměn elektrický výboj o nízkém napětí a vysokém tlaku, jenž prochází ionizovaným prostředím. Aby byl proces svařování stabilní, je potřeba dodávat výboji dostatečný proud k udržení zionizovaného plazmatu a napětí, které zajistí ionizaci prostředí. Stabilní proces se vyznačuje přiměřeným rozstříkem kovu a rovnoměrným hořením oblouku. Jako takový je ovlivněn vlastnostmi svařovacího zdroje, svařovacími parametry, přídavným materiálem či ochranným plynem. [1; 42; 57]



Obr. 18 Rozložení napětí na oblouku [1].

Oblouk je elektrickým spotřebičem, jehož celkový odpor se skládá ze tří složek (dílků spotřebičů). Katodové oblasti (KO), anodové oblasti (AO) a sloupce oblouku, viz obr. 18. Sloupec oblouku je spotřebič s konstantním el. odporem. AO a KO jsou spotřebiče s klesajícím odporem. [1; 42]

Proud protékající elektrickým obloukem způsobuje úbytky napětí ve všech jeho oblastech. Zvyšující se hodnota proudu snižuje podíl úbytků napětí KO a AO, dominantním se stává sloupec oblouku, což z charakteristiky oblouku vytváří nad hodnotou 70 A spotřebič s konstantním odporem. Napětí se poté zvyšuje téměř lineárně s narůstajícím proudem. S prodlužující se délkou oblouku narůstá napětí a zvyšuje se tepelný výkon. Závislost napětí na elektrickém proudu znázorňuje statická voltampérová (VA) charakteristika elektrického oblouku a jeho částí, viz obr. 19. [1; 42; 57]

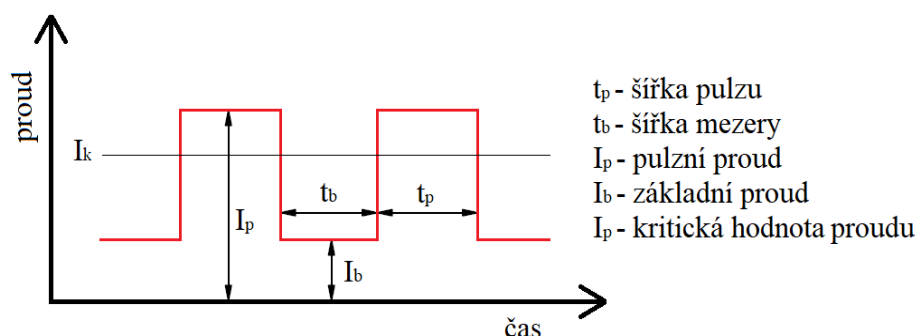


Obr. 19 Statická VA charakteristika elektrického oblouku a jeho částí [42].

Metody svařování s tavící se elektrodou MIG, MAG umožňují volbu několika způsobů přenosu svarového kovu. Základní způsoby přenosu jsou nastaveny zejména určitými hodnotami napětí a proudů. Jsou rozlišovány tři základní druhy přenosu – zkratový, kapkový a sprchový:

- Zkratový přenos nastává u krátkých oblouků, které vznikají při malých napětích (14-22 V) a prouděch (30-200 A). Zároveň je nízká hodnota proudové hustoty elektrody. Průchodem proudu je drátová elektroda tavěna a na jejím konci vzniká kapka. Při oddělování od elektrody kapka kovu vyplní mezeru mezi drátem a svarovou lázní, čímž dochází k elektrickému zkratu (enormnímu nárůstu hodnoty proudu), zhasnutí oblouku a oddělení kapky do svarové lázně elektromagnetickými silami. Následně je oblouk opět zapálen a děj se opakuje. Proces vnáší do materiálu málo tepla. Vhodný je pro svařování tenkých materiálů či kořenových housenek ve všech polohách. [1; 42; 58]
- Sprchový přenos nastává při dlouhém oblouku s vysokou proudovou hustotou, napětími 28-40 V a proudy 200-500 A. Kapky jsou ze zúženého konce nataveného drátu postupně oddělovány elektromagnetickými silami ve formě velmi malých kuliček, aniž by došlo ke styku elektrody s tavnou lázní (zkratu). Bezzkratový přenos může nastat u oblouků delších než 3 mm. Vhodné je použití pro svařování plechů větších tlouštěk. [1; 42; 58]
- Kapkový přenos je principiálně stejný jako sprchový, ale nastává při nižších prouděch (200-300 A) a napětích (24-28 V). Kapky mají oproti předchozímu procesu mnohem větší rozměry a jsou oddělovány s menší frekvencí především gravitační silou. Doporučuje se pro svařování ve vodorovných polohách. [1; 42; 58]
- Přechodového přenosu se dosahuje při hodnotách napětí a proudů na rozhraní mezi kapkovým a sprchovým přenosem. Vyskytují se zde kapky malé i velké a je oproti kapkovému přenosu stabilnější. [1; 42]
- Pulzní přenos je speciálním případem. Proud nemá jednu hodnotu, ale pohybuje se na dvou hladinách – základní a pulzní. Pulzní musí být vyšší než kritická hladina potřebná k oddělení kapky. Na pulzní hladině dochází k zahřívání materiálu a tvorbě kapky na konci elektrody. Před dopadem odtavené kapky do lázně klesá proud na základní hladinu, aby nedošlo k přehřátí kapky a elektrody. U procesu je nastavována kromě hodnot proudů i délka jednotlivých pulzů. Při optimálním nastavení je v každém pulzu oddělována jedna

kapka kovu, díky čemuž lze efektivně řídit vnesené teplo do svaru a také minimalizovat rozstřík. Průběh pulzního proudu je zobrazen a popsán na obrázku 20. [1; 42]



Obr. 20 Průběh pulzního proudu [1].

Svařováním je do materiálu vnášeno teplo, jehož množství ovlivňuje chování materiálu. Musí být dodáno takové množství tepla, aby došlo k provaření kovu. Zároveň ale při vnesení nadměry energie dochází k přehřátí materiálu a při dodávání dalšího tepla také k nežádoucím strukturním změnám, jako je hrubnutí zrna u ocelí či vytvrzení svarů u některých Al slitin. Výpočet vneseného tepla je možný dle vztahu 2.1 [59]:

$$Q_{sv} = \eta \cdot \frac{I \cdot U}{1000 \cdot v} \text{ [kJ]}, \quad (2.1)$$

kde: η – účinnost procesu (pro svařování MIG voleno 0,7) [-],
 I – svařovací proud [A],
 U – svařovací napětí [V],
 v – rychlost svařování [mm·s⁻¹].

U pulzního svařování je počítáno vnesené teplo zvlášť pro pulzní proud a základní proud, načež je každá z hodnot vynásobena poměrem času, který zaujímá během jednoho pulzu. Redukce vneseného tepla do svaru se dosahuje nastavením nízkých hodnot základních svařovacích proudů. [59]

2.2.1 Svařovací zdroje

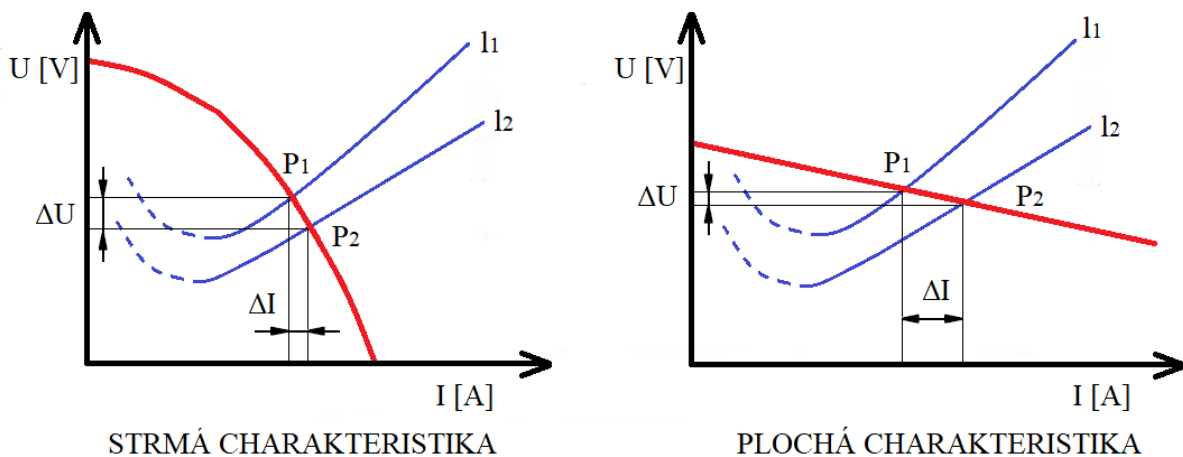
Zařízení dodávající uzavřenému elektrickému obvodu proud požadovaných vlastností se nazývají svařovacími zdroji. Jejich úkolem je zajištění energie potřebné k zapálení a hoření elektrického oblouku a též k udržení stability procesu. Mezi základní parametry zdrojů patří jejich statická charakteristika, pracovní bod a dynamická charakteristika. [1; 42; 57]

Statická charakteristika udává křivku závislosti napětí na proudu v ustáleném stavu svařování. Krajní body křivky vymezují stav naprázdno a stav nakrátko. Ve stavu naprázdno neprochází obvodem žádný proud, napětí je nejvyšší. Stav nakrátko nastává při zkratu (kontaktu elektrody s materiálem). Obvodem při něm protékají vysoké proudy, napětí se blíží nule. Se zvyšujícím se proudem napětí na zdroji klesá. [1; 42; 57]

Pracovním bodem je myšlen průsečík mezi statickou charakteristikou zdroje a statickou VA charakteristikou elektrického oblouku a jeho částí. Při svařovacím procesu dochází ke kolísání délky oblouku (změně napětí). Zdroje mají různé charakteristiky, dle nichž na změnu napětí reagují. U zdrojů se strmou charakteristikou (obr. 21 vlevo) dochází při větší změně napětí k menším změnám svařovacích proudů. Jsou nazývány „měkké“ či „s konstantním proudem“. Tento typ je vhodný pro metody TIG a MMA. U zdrojů s plochou charakteristikou (obr. 21 vpravo) se při zvyšování proudu napětí mění jen mírně. S ohledem na malou změnu napětí jsou označovány jako „tvrdé“ nebo „s konstantním napětím“. Charakteristika se používá pro MIG a MAG svařování. Určitým mezikrokem mezi strmou

a plochou je polostrmá, mírně klesající charakteristika. Vyskytuje se u zdrojů, u nichž napětí klesá s rostoucím proudem tak, že hodnota součinu $U \cdot I$ je téměř konstantní. Označují se jako „s konstantním výkonem“. [1; 42; 57]

Dynamická charakteristika popisuje schopnost zdroje vypořádat se s opětovným zapálením oblouku při zkratu či rozstříkem během svařovacího procesu. Strmost křivky závislosti napětí na proudu se musí pohybovat v určitém rozsahu a ovlivňuje formování svarové housenky. Pokud je strmější, proces vytváří nadměrný rozstřík. V případě, že je charakteristika výrazně plochá, dochází k lepení drátu. [1; 42]



legenda:

ΔI - rozdíl svařovacího proudu

ΔU - rozdíl svařovacího napětí

l_1, l_2 - VA charakteristiky oblouků 1 a 2

P_1, P_2 - pracovní body

Obr. 21 Plochá a strmá charakteristika svařovacího zdroje [57].

Svařovací zdroje lze dělit podle několika kritérií. Lze je rozlišovat podle způsobu přeměny energie na rotační (svařovací dynamo) a netočivé zdroje (svařovací měniče, transformátory a usměrňovače). V dnešní době jsou využívány zejména netočivé:

- Transformátory – jsou zdroji většinou jednofázového střídavého proudu. Tvořeny jsou dvěma cívkami. Průchodem proudu první cívkou je v druhé indukováno střídavé napětí. Při zapálení oblouku indukované napětí způsobí vznik svařovacího proudu v uzavřeném obvodu. Zdroje mají polostrmou statickou charakteristiku. Používají se pro svařování metodou TIG či MMA. [1; 42]
- Usměrňovače – poskytují stejnosměrný proud, jenž je usměrněn pomocí usměrňovačů připojených v sekundární cívce transformátoru. Pro svařování vysokými proudy je vhodné použití třífázového svařovacího usměrňovače namísto jednofázového, protože má lepší svařovací vlastnosti a méně zatěžuje elektrickou síť. Výhodou tohoto typu zdrojů je možnost použití stejnosměrných i střídavých proudů a dobrá reakce na rychlé změny napětí a proudů při svařování. [1; 42]
- Invertorové zdroje – nejprve usměrní střídavé napětí a následně jej pomocí tranzistorů přemění na vysokou frekvenci. Potřebná velikost a hmotnost transformátoru se snižuje s jeho pracovní frekvencí, tudíž jsou díky vysokým hodnotám frekvence redukovány rozměry a hmotnost zdroje. Dalšími výhodami jsou stabilita a hodnota svařovacího výkonu a variabilita nastavení statických charakteristik pro MAG/MIG, TIG, MMA. [1; 42]
 Díky řídicí elektronické jednotce lze nastavovat svařovací procesy, na základě kterých si následně pro potřeby svařování zdroj sám nastaví parametry včetně rychlosti posuvu

drátu či množství ochranné atmosféry. Je možné sledovat průběh svařování a exportovat záznamy. Další výhodou řídicí jednotky je schopnost v reálném čase vyhodnocovat stabilitu procesu a případné odchylky dle přednastavených hodnot upravovat. [1; 60]

Moderní svařovací zdroje jsou konstruovány tak, aby co nejvíce usnadnily obsluhu nastavení procesů a zrychlily je. Existuje tzv. synergický režim svařování, při kterém se potřebné parametry mění podle změny jednoho parametru, například rychlosti podávání přídavného drátu. Synergické režimy jsou optimalizovány pro konkrétní svařované materiály, tloušťky přídavných materiálů a ochranné atmosféry. Obsluha vybere z databáze odladěnou charakteristiku a zdroj automaticky nastaví proces tak, aby byl po celou dobu svařování stabilní. Databázi charakteristik má každý výrobce zdrojů vlastní. [1; 60]

Pro volbu zdroje jsou důležité jeho parametry. Dělí se na vstupní, které udávají podmínky pro připojení zdroje do sítě, a na výstupní, jež udávají svařovací vlastnosti zdroje. Mezi vstupní se řadí frekvence, způsob jištění, maximální příkon stroje, síťové napětí aj. Výstupními údaji jsou rozsah nastavení svařovacích proudů, napětí; jmenovité proudy při určitých zatíženích a teplotách či napětí naprázdno. Zatížení je udáváno v procentech a vyjadřuje čas svařování zdroje ku celkovému pracovnímu času cyklu. [1; 61]

2.3 Robotizované MIG svařování

Robotizace svařování má mnoho výhod. Programátor nadefinuje robotu, co a jak má svařit, nastaví potřebné parametry a po počáteční časové investici jej již není potřeba neustále obsluhovat. Robot vytváří spoje stále stejné dle nastaveného programu, neunaví se, nedělá chyby a je rychlý, čímž zkracuje čas výroby a šetří náklady.

Je snaha snižovat míru obsluhy robotů, směřovat k automatizaci procesů. V dnešní době platí, že si některé roboty jsou schopny samy zakládat polotovary do svařovacích přípravků, vyjímat hotové díly či si čistit/měnit kontaktní špičku (průvlak). Ovšem stále je potřeba občasných zásahů obsluhy, která vymění cívku/krabici s PM či opotřebované díly robotu. [62]

Robotické MIG svařování má oproti ručnímu další výhody, mezi něž patří například [35]:

- přesné, opakovatelné vedení hořáku;
- libovolně nastavitelný úhel sklonu hořáku (tilt angle), který umožňuje případné naklonění hořáku vůči tlustšímu plechu, aby došlo k potřebnému průvaru;
- nastavitelný úhel tlačení hořáku (push angle), který je doporučován pro spojování Al slitin;
- umožnění přesného rozkyvu hořáku;
- nastavení libovolné rychlosti svařování.

Je třeba zdůraznit, že značnou výhodu přináší možnost během procesu dle potřeby měnit rychlosti svařování, nastavené parametry či pozici hořáku. [35]

Svařování je z důvodu bezpečnosti často prováděno ve svařovacích buňkách, tzv. cells, viz obr. 22. Buňky pro MIG svařování jsou běžně vybaveny prvky, které jsou níže sepsány a rozebrány [1; 63]:

- Základním prvkem je robot, který je ovládán řídicí jednotkou a ovládacím přístrojem (teach pendant), prostřednictvím něhož s robotem komunikuje obsluha.
- Polohovadlo či polohovací stůl slouží k upnutí dílů, přípravků. Díky natáčení polohovadla je umožněno svaření pro robota běžně těžko přístupných míst.
- Svařovací hořák je připevněn na koncové rameno robota. Skládá se mj. z průvlatku drátu, jímž prochází drátová elektroda a mezi nímž a materiálem hoří elektrický oblouk. Průvlak je obklopen plynovou tryskou, která upravuje příchod ochranné atmosféry do místa svaru.
- Ochranná atmosféra je do hořáku vedena pomocí hadic buď z tlakové nádoby, nebo z centrálního rozvodu plynu v podniku.
- Přídavný drát je přiváděn do hořáku systémem kladek. Je odvíjen z cívek či z větších sudových zásobníků.

- Svařovací zdroj zajišťuje dostatečný přísun elektrické energie pro svařování.
- Kontrolor svařovacích procesů ovládá přívod energie, přidavného materiálu a ochranné atmosféry potřebné pro zvolený proces.
- Komunikační rozhraní (interface) je potřebné pro spolupráci robota se svařovacím zařízením.
- Bezpečnostní prvky buňky slouží k ochraně pracovníků. Pracovní prostor robota je vymezen zástěnami, pouze vstup není zahrazen, ale je kontrolován senzory, světelnými závory. V případě překročení závory pracovníkem při chodu robota dochází k zastavení robota. Dále musí být buňka vybavena STOP tlačítky, stejně jako každé jiné strojní zařízení.

V následujících kapitolách jsou popsány vybrané prvky robotických svařovacích buněk. S ohledem na vybavení firmy AWL-Techniek CZ dané k dispozici pro řešení diplomové práce je rozebrán robot ARC Mate 120iD od společnosti FANUC a svařovací vybavení společnosti SKS Welding.



Obr. 22 Svařovací buňka [64].

2.3.1 Robot ARC Mate 120iD

Jedná se o šestiosého robota vhodného ke svařovacím aplikacím. Má duté tělo, díky čemuž lze vést přidavný drát, hadice pro ochranný materiál a ostatní kabeláž vnitřkem. Pracovní rozsah je 1831 mm a zařízení dokáže svařovat i v polohách blízkých jeho základně. [65]

Osy otáčení (OO) robota jsou znázorněny na obrázku 23, dle něhož je zřetelné, že každá z os umožňuje robotu provádět specifický pohyb:

- OO 1 umožňuje natáčení ramene do stran, pokrývat pracovní prostor nalevo a napravo od základny;
- OO 2 naklápí paži dopředu a dozadu, čímž dosahuje prostorů před a za základnou;
- OO 3 dovoluje další pohyb ve svislém směru, zvyšuje dosah robota;
- OO 4 umožňuje rotaci předloktí;
- OO 5 zvedá a sklápí zápěstí;
- OO 6 dovoluje rotaci zápěstí, lze díky ní nastavit úhel tlačení hořáku. [66]



Obr. 23 Šestiosý robot FANUC [65].



Obr. 24 iPendant Touch.

Robota lze natáčet v jednotlivých šesti osách v tzv. souřadném systému (SS) „Joint“. Dále lze využít SS globálního (World) s pohybem v pevně nastavených osách x, y, z a rotací kolem nich. Třetím možným je SS nástroje (Tool), kdy osa z je totožná s osou hořáku a osy x, y jsou pohyby v kolmé rovině. Středem tohoto SS je uživatelem definovaný bod v ose nástroje. Pro svařování je volen v přesně nastavené vzdálenosti od kontaktní špičky. [66; 67]

Ovládání pohybů, jejich přesnost a rychlost zajišťuje řídicí jednotka R-30iB Plus. Kromě os robota dokáže ovládat i několik přídatných pohybů, například naklápění polohovacího stolu. Pokyny jsou řídicí jednotce dodávány skrze přístroj iPendant Touch (obr. 24), pomocí něhož jsou vytvářeny programy. [68; 69]

Program je zapisován ve formě řádkového kódu skládajícího se z bodů, volby pohybu mezi nimi a svařovacích příkazů (obr. 25). Body jsou ukládány pomocí funkce „Touch Up“ ve chvíli, kdy se robot nachází v požadované pozici. Mezi jednotlivými body se může robot pohybovat třemi druhy pohybů. „Linear“ pohyb spojí body A a B po přímce. Typ „Joint“ definuje pouze počáteční a koncovou pozici robota. Je volen ve chvíli, kdy není důležitá dráha chodu robota mezi nimi. Třetí typ „Circular“ je použit pro pohyb po oblouku. Skládá se z počátečního, koncového a jednoho bodu nacházejícího se na oblouku. [66; 67]

Dále je definovaná rychlost pohybu robota mezi body v $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ či v procentech maximální rychlosti a také požadavek na přesnost dosažení pozice. Volí se, zda je požadován průjezd přímo zadaným místem, či postačí, aby se mu robot přiblížil s určitou přesností. V případě požadavku přesného dosažení bodu je zadán příkaz „Fine“, přičemž robot v bodě na okamžik zastaví. Pokud není požadován přesný průjezd, v kódu je uveden příkaz „CNT“ spolu s číslem mezi 0-100 značícím procento průjezdové rychlosti robota. Platí, že se vzrůstající rychlostí se přesnost přiblížení bodu snižuje. [66; 67]

Robot může pracovat ve třech režimech – T1, T2 a „Auto“. T1 značí režim omezený maximální rychlostí pohybu $250 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Je vhodný pro počáteční zadávání (teachování) trajektorie robota. T2 se volí pro zkoušku reálné rychlosti pohybu. Mezi T1 a T2 nastává rozdíl zejména v trajektorii pohybu zadaného pomocí „Joint“ či „CNT“, protože robot má tendenci si trajektorii zkracovat a je zvýšené riziko kolize. I proto lze v T1 a T2 režimech nastavovat povolené procento z maximální dosažitelné rychlosti. Je vhodné rychlost po krocích zvyšovat a sledovat

chování robota. Po odladění trajektorie je systém přepnut do režimu „Auto“ a nastává automatizovaný chod. [66; 67]

Svařovací příkazy jsou zadávány do kódu pomocí předdefinovaných podprogramů, v nichž jsou naprogramovány potřebné úkony. Jedná se o kódy „Pre Weld“, jímž je vyvolán svařovací program z kontroloru, „Start Weld“, po jehož přečtení je zapálen oblouk, a „End Weld“, který oblouk zhasíná. [66; 67]

Je nutné zmínit i bezpečnostní prvky. Aby bylo možné ovládat pohyb robota, je nutné mít neustále stisknuto tlačítko „Deadman“ spolu s klávesou „Shift“ nacházející se na iPendantu. V případě povolení stisku jednoho z tlačítek se robot okamžitě zastaví. [66; 67]

```
11:J P[4] 80% CNT100
12:
13: CALL R1 PRE_WELD(1,1,24,2,80)
14:L P[5] 250mm/sec FINE
15: CALL R1 START_WELD
16:L P[7] 6mm/sec CNT100
```

Obr. 25 Příklad kódu programu na robotu FANUC.

2.3.2 Zařízení pro robotizované svařování společnosti SKS Welding

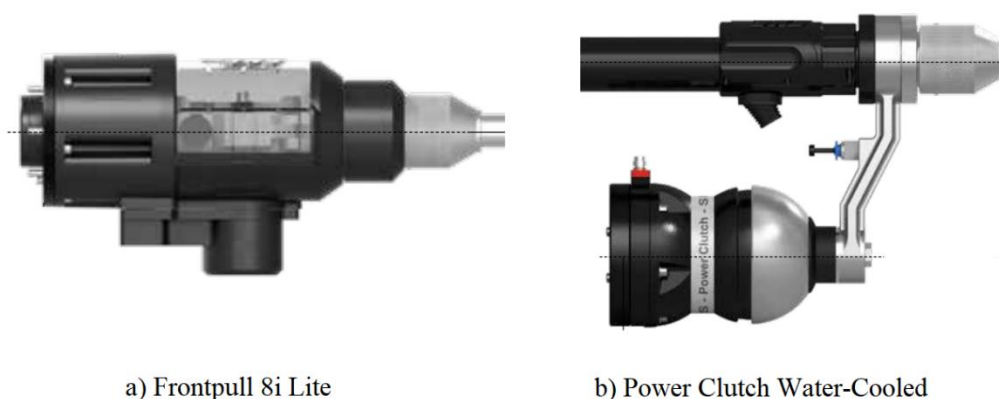
Zmíněná společnost dodává pro robotizované svařování tzv. svařovací balíčky (Welding Packages) skládající se z prvků, díky nimž se z prostého průmyslového robota stává svařovací. Jedná se o různé druhy hořáků v kombinaci se systémy vedení drátu, svařovacími zdroji, rozhraními, řídicími jednotkami a dalšími součástmi. Balíčky lze dělit do několika kategorií dle použitého hořákového systému [35; 70; 71]:

- „Single Wire“ – jsou základní balíčky využívající svařování jedním drátem pomocí základního MIG procesu či pulzních procesů. Lze je použít pro svařování s přídavnými dráty průměrů 0,8-1,6 mm. Podle typu vedení robota a způsobu chlazení se konstrukčně dělí na hořáky s vnitřním vedením drátu (Power Joints, Water Joints) a s vnějším vedením drátu (Power Clutches). Speciálním případem v této sekci balíčků je systém „Wire Select 2.0“, který lze použít pro roboty s vnějším vedením kabelů. Do hořáku jsou přiváděny 2 dráty stejného průměru, jež mohou být během svařování automaticky měněny.
- „Single Wire Frontpull“ – jsou zlepšením předchozí skupiny balíčků. Lze je použít pro stejné aplikace a navíc i pro svařování procesy microMIG a microMIG-CC, protože systémy umožňují zpětný pohyb drátové elektrody, a tím regulují teplo vnesené do materiálů. Podobně jako systémy „Power Joint“ a „Water Joint“ umožňují nekonečnou rotaci na šesté ose robota. Kabel mezi podavačem a hořákem je statický, bez přetáčení.
- „Dual Wire“ – umožňuje svařování dvěma elektrodami zároveň. Systém lze použít u robotů s vnějším vedením kabeláže.
- „Single Wire Semi-Automatic“ – jsou systémy sloužící pro ruční svařování za pomoci svařovacích zdrojů běžně používaných pro robotické svařování.
- „Single Wire Stand Alone“ systém – slouží ke svařování na automatech. Nemá tolik volnosti pohybu jako robotické aplikace, ale pro jednoduché svařence je levnou variantou při možnosti využití celého potenciálu svařovacího zařízení. Hořák koná pouze několik základních pohybů, zbylé obstarává rotační, popř. lineární jednotka.



Obr. 26 Koncová část hořáku HGX [35].

Na obrázku 26 je vyobrazena koncová část hořáku HGX, kterou má většina hořákových systémů společnou. Systémy se od sebe odlišují v provedení spojek, které spojují koncovou část hořáku s robotem. Do ní se napojují kabely s elektrodou a ochranným plynem. Přípojné místo hořáku s protistranou je osazeno dvěma excentrickými piny, aby byla zaručena vždy stejná poloha hořáku. Dále jsou vybaveny bajonetovou maticí, která zabezpečuje rychlou fixaci hořáku, viz obr. 27. [35; 70; 71]



Obr. 27 Spojky hořákových systémů [70].

Ochranná atmosféra je vedena ze zdroje plynu do hořáku vnitřkem proudového kabelu, stejně jako samotný přídavný materiál. Pohyb drátu zajišťuje podavač drátu PF5 LEA složený z čtyřkladkového pohonu (obr. 28). V prostoru mezi podavačem a cívkou s PM prochází drát skrze vedení, jímž bývá bowden s ocelovým jádrem nebo z polymeru pro minimalizaci opotřebení elektrody. Zařízení dokáže kontrolovat rychlost podávání drátu a snímat průtok ochranného plynu. [63; 35; 70]

Zdrojem energie pro svařování je systém LSQ5, který dokáže rychle reagovat na změny parametrů v procesech a tím udržovat jejich stabilitu. Lze jej použít pro svařování MIG, MAG, TIG i pro speciální procesy společnosti SKS Welding. V tabulce 7 jsou vypsány jeho základní vstupní a výstupní parametry. [61; 63]

Tab. 7 Vybrané vstupní a výstupní parametry zdroje LSQ5 [61].

parametr	hodnota
síťové napětí (tolerance)	3x400 V / 3x480 V ($\pm 10\%$)
frekvence	50/60 Hz
maximální příkon stroje	25,8 kVA
síťová pojistka	tavná pojistka pomalá 35 A
třída izolace / krytí	H / IP23
rozsah svařovacích proudů a napětí pro MIG	15 A / 14,8 V – 480 A / 38 V
napětí naprázdno	70 V
jmenovitý proud: 40 °C, 40% *	480 A
jmenovitý proud: 40 °C, 60%	420 A
jmenovitý proud: 40 °C, 100%	325 A
jmenovitý proud: 20 °C, 40%	500 A
jmenovitý proud: 20 °C, 60%	440 A
jmenovitý proud: 20 °C, 100%	340 A

(* jmenovitý proud při okolní teplotě 40 °C a 40% zatížení)

Parametry jednotlivých svařovacích procesů jsou ovládány pomocí řídicích jednotek. Jedná se o zařízení, která na základě požadovaného svařovaného materiálu, typu ochranné atmosféry a přídavného materiálu zvolí z databáze charakteristiku, podle níž řídicí jednotka nastaví svařovací parametry. Lze je dle potřeby poupravit především pomocí změny rychlosti podávání drátu, jež synergicky mění ostatní parametry. [35; 63; 71]



Obr. 28 Podavač drátu PF5 [63].



Obr. 29 Řídicí jednotka Q80 [63].

Procesor komunikuje s podavačem drátu, svařovacím zdrojem a skrze rozhraní také s robotem. Moderní zařízení Q84 dokáží ovládat až 4 svařovací zdroje najednou. Pokud je třeba ovládat pouze jeden zdroj, jednoho robota, postačí procesor Q80 (obr. 29). Jednotku lze řídit přímo skrze dotykovou obrazovku či v PC programu Q8Tool4 po připojení prostřednictvím ethernetového kabelu. Parametry je nutné nastavit tak, aby byl stabilní oblouk a dostatečný průvar. Svařovací programy jsou sice pro určité materiály a jejich tloušťky přednastavené, ale v jistých případech je nutné jejich doladění. To souvisí do značné míry se svařovací polohou

a rychlostí svařování. Kontrolor Q80 umožňuje uchování až 744 různě nastavených svařovacích programů rozdělených do 4 skupin po 31 jednotkách. Jednotka může obsahovat 6 programů se stejným základním nastavením. Konkrétně se jedná o parametry počátku a konců svařování, průtok ochranné atmosféry či typ procesu a zvolenou charakteristiku. Svařování hliníkových slitin je z důvodu velkého odvodu tepla materiálem problematické, a proto musí být kladen důraz na nastavené parametry, zejména v počátečních a koncových částech spojů. [63; 71; 72] Pro dostatečnou kvalitu počáteční části svaru a stabilitu svařování je u SKS procesů nastavována kombinace parametrů a funkcí shrnutá do označení „Hot Start“. Jedná se o tyto proměnné:

- předfuk plynu (Pre Gas Flow) pro redukci procesu oxidace v počátku svaru,
- funkce „Lift Arc“ pro stabilní zapálení oblouku,
- dostatečně vysoká rychlost posuvu drátu pro zahřátí ZM,
- spád (Slope) pro pozvolný pokles posuvu drátu na nižší hodnoty,
- doba trvání počáteční fáze svařování. [35; 71]

V koncové části spoje je opět nutné nastavit parametry procesu, aby bylo zamezeno tvorbě trhlin či výrazných koncových kráterů. Parametry a funkce ovlivňující kvalitu této části svaru shrnuté pod označení „End Crater Filling“ jsou:

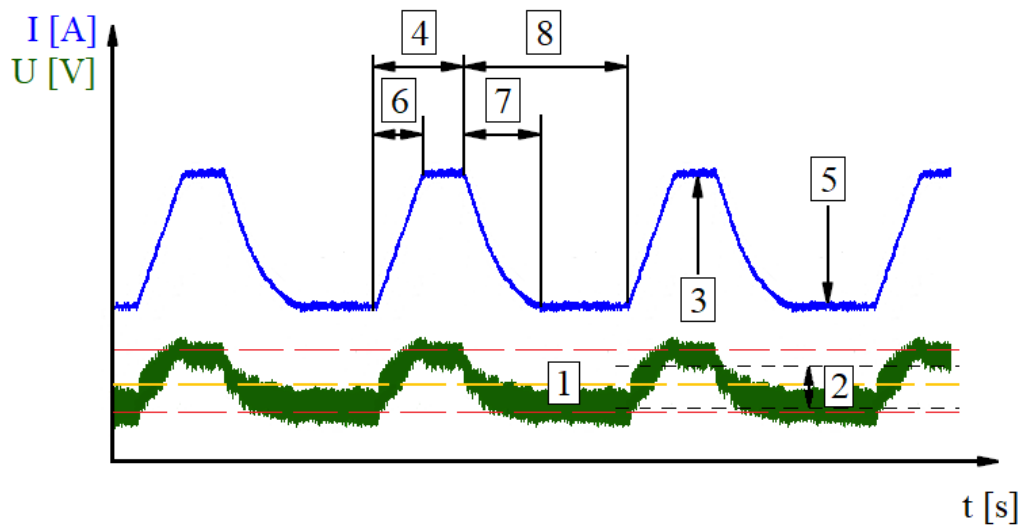
- dofuk plynu (Gas Past Flow),
- funkce „Arc Off“ pro zhasnutí oblouku,
- nižší rychlost posuvu drátu,
- spád (Slope) pro pozvolný pokles posuvu drátu na koncové hodnoty,
- doba svařování koncové části svaru,
- parametr dohoření drátu (Burn Back) po zhasnutí oblouku. [35; 71]

Zdroje společnosti SKS Welding umožňují svařovat pomocí speciálních pulzních procesů, díky nimž je redukováno teplo vnesené do svaru. Jedná se o procesy I-Pulse, KF-Pulse, microMIG a microMIG-CC, přičemž všechny mohou být použity ve variantě DP (dvojitý pulz) pro zlepšení vlastností:

- I-Pulse – je pulzní proces, u nějž je drát oddělován do lázně bezzkratově. Základní parametry procesu jsou nastavené synergickými křivkami podle zvoleného přídavného materiálu. U některých může být hodnota manuálně zkorigována v rámci určitého rozsahu. Jednotlivé parametry označené číslicemi 1-7 jsou znázorněny na obrázku 30, který ukazuje závislost napětí a proudu na čase. Jedná se o:
 - průměrnou hodnotu napětí (1),
 - korekci napětí (2),
 - pulzní proud (3)
 - dobu pulzu (4),
 - základní proud (5),
 - vzestup proudu (6),
 - pokles proudu (7),
 - dobu základního proudu (8). [35; 60]

I-Pulse je výhodný k použití z několika důvodů:

- je snadno nastavitelný a vhodný pro jednoduché operace,
- umožňuje automatickou korekci délky oblouku,
- dobře přenáší teplo,
- je bezzkratový (eliminuje rozstřík),
- lze jej použít se všemi druhy SKS balíčků. [35; 60]



Obr. 30 Závislost napětí a proudů na čase u procesu I-Pulse [35].

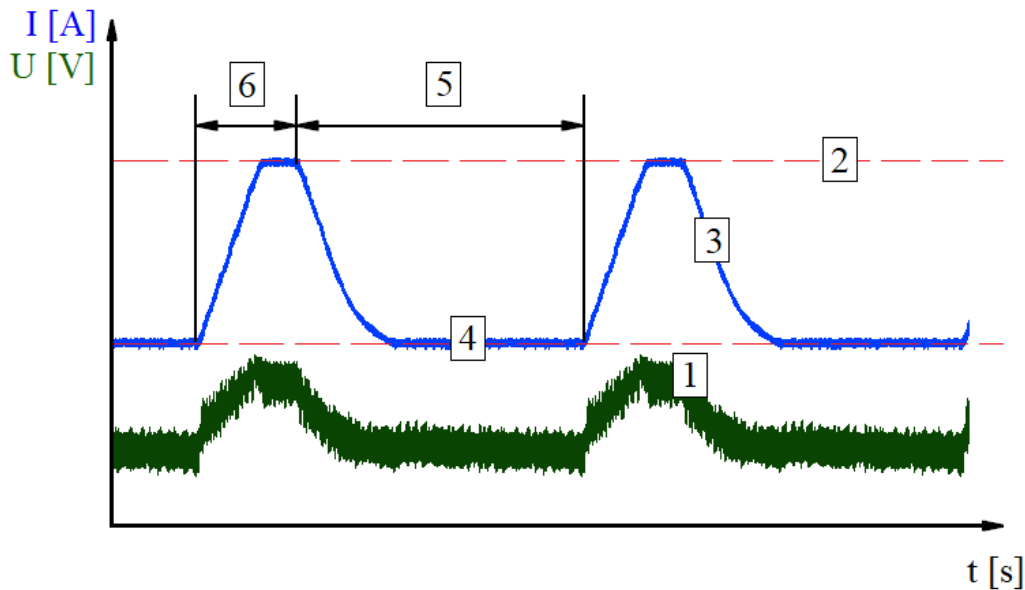
Proces pro kontrolu a korekci délky oblouku využívá funkci Autocomp. Při měnící se délce elektrického oblouku (např. u nerovných povrchů) je upravována hodnota napětí, díky čemuž hoří oblouk stále ve stejném místě. [35; 60]

Ovládání délky oblouku pomocí napětí s sebou přináší problém, protože oblouk výrazně elektromagneticky pracuje. Při přechodu přes geometrickou nepřesnost se oblouk magnetuje na bližší či teplejší materiál, což je nežádoucí, a proto byl vytvořen proces KF-Pulse, který problém eliminuje. [60]

- KF-Pulse – je speciální bezkratový pulzní proces pro svařování krátkými oblouky. Jsou nastaveny limitní hodnoty proudů i napětí, čímž je vytvářena tzv. charakteristika pole, jež je udávána v procentech využití maximálního výkonu zdroje. Procesor si hodnoty parametrů nastavuje tak, aby oblouk hořel stabilně. Nastavením charakteristiky je limitováno maximální množství přeneseného tepla během pulzu. [35; 60]

Základní nastavované parametry procesu jsou označené čísly na obrázku 31, ukazujícím závislost napětí a proudu na čase. Jsou jimi:

- pulzní napětí (1),
- charakteristika pole (2),
- pokles proudu (3),
- základní proud (4),
- doba základního proudu (5),
- doba pulzu (6). [35; 60]



Obr. 31 Závislost napětí a proudů na čase u procesu KF-Pulse [35].

Délka oblouku se u procesu koriguje změnou doby základního proudu (parametr č. 5). Zvyšováním doby výdrže na základní hladině proudu se dosahuje kratšího oblouku – hoří blíže svarové lázni. Zkracováním doby je délka oblouku zvětšována, ten hoří víc u špičky a v krajním případě hrozí její zatavení. [60]

Výhodami procesu jsou:

- velmi krátký výkonný oblouk,
 - snížení vneseného tepla do svaru,
 - redukce rozstříku,
 - možnost použití se všemi SKS systémy,
 - schopnost přemostění mezer a aplikace při svařování mimo polohy. [35]
- MicroMIG a microMIG-CC – jsou použitelné jsou pro svařování tenkých plechů za pomoci SKS balíčků vybavených systémem Frontpull schopným zpětného chodu drátu. Principem je mechanické oddělení kapky s mezipulzy či bez nich. Délka oblouku je řízena časem zpětného chodu. Delší čas znamená delší oblouk, čímž je zvýšeno dodané teplo na danou šířku svaru. [35; 60]

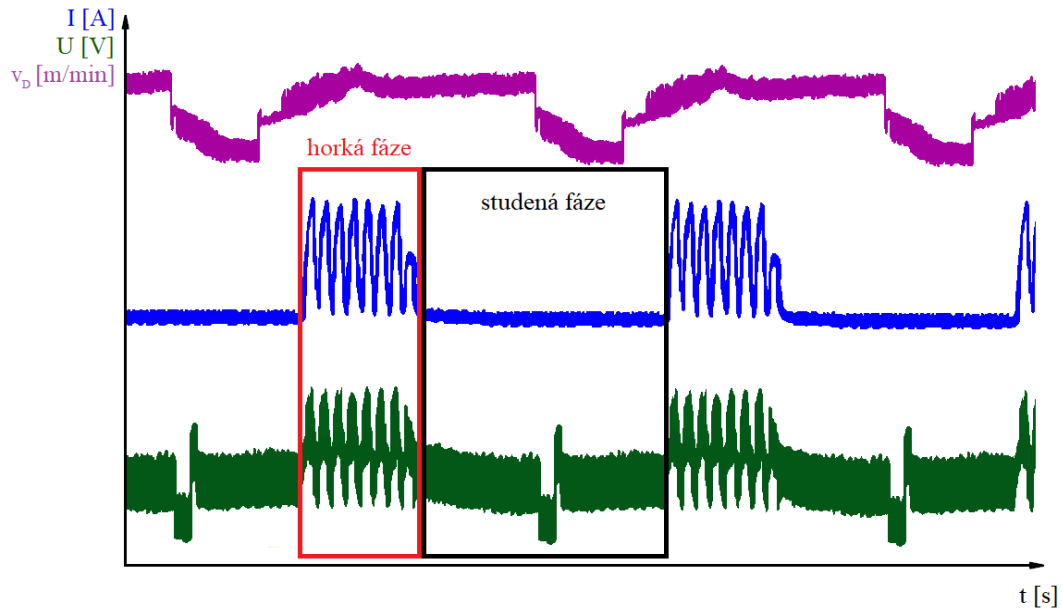
Proces microMIG se skládá ze dvou fází. V první, tzv. horké fázi je proveden daný počet pulzů. Do lázně je dopravován materiál, aniž by došlo k dotyku přídavného materiálu se základním. Základní materiál je v této fázi taven, vytváří se svarová lázeň. Poslední pulz v sérii taví konec drátu, na kterém vzniká kapka. Následuje druhá fáze procesu, studená, kdy je drát vnořen do lázně, následkem čehož nastává zkrat. Kapka je oddělena zpětným chodem drátu, jenž pokračuje do doby nastavení potřebné vzdálenosti od svarové lázně. V tu chvíli se chod drátu otočí do dopředného, oblouk je znovu zapálen a opakuje se první fáze procesu. Během studené fáze dochází k ochlazení místa svaru odvodem tepla do vzdálenějších míst materiálu. Závislost napětí, proudu a směru chodu drátu na čase je zakreslena na obrázku 32. [35; 60]

Parametry, kterými se microMIG řídí, vychází z KF-Pulse. Oblouk je ovládán pomocí charakteristiky pole, stejně tak jsou nastavovány parametry jednotlivých pulzů – doba trvání, základní a pulzní hladina proudu aj. Oproti KF-Pulse jsou zde navíc nastavovány délka série pulzů či doba zpětného chodu drátu. [35]

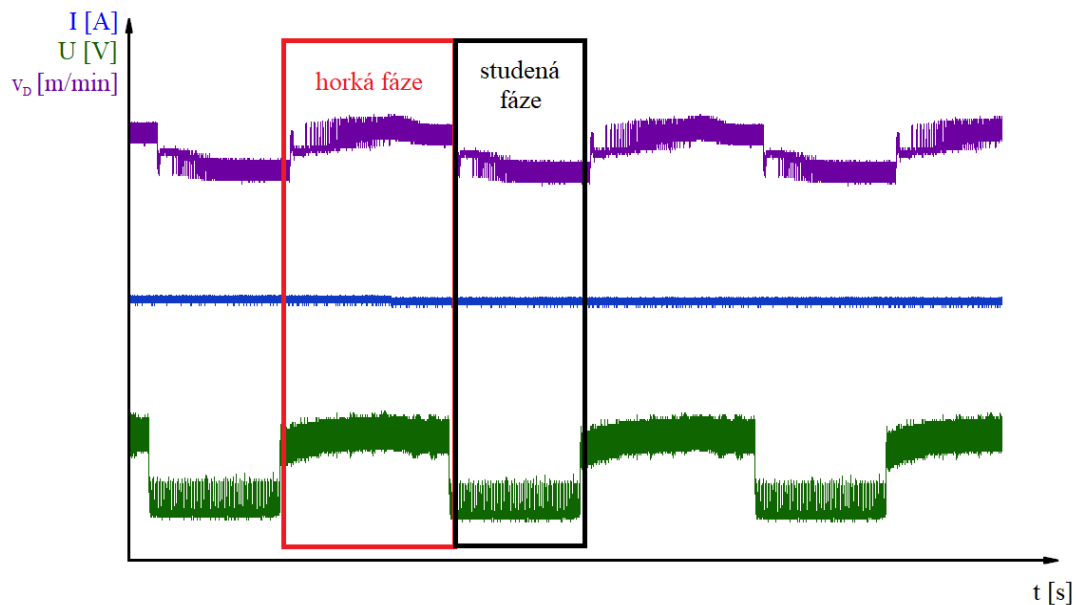
MicroMIG-CC neobsahuje mezipulzy, viz obr. 33. Během horké fáze procesu je proud nastaven na stálé hladině, která zajistí dostatečné tavení ZM a tvorbu kapky na konci drátu.

Během studené fáze je drát vnořen do lázně, dochází ke zkratu a zhasnutí oblouku. Elektroda je vytažena z lázně, dochází k obnově oblouku a změně chodu drátu na dopředný směr. [35; 60]

Řízení probíhá pomocí menšího množství parametrů než u procesu s mezipulzou. Nastavuje se především hodnota základního proudu, doba reverzního chodu drátu a rychlost posuvu drátu. [35]



Obr. 32 Závislost napětí, proudů a směrů posuvu drátu na čase u procesu microMIG [35].

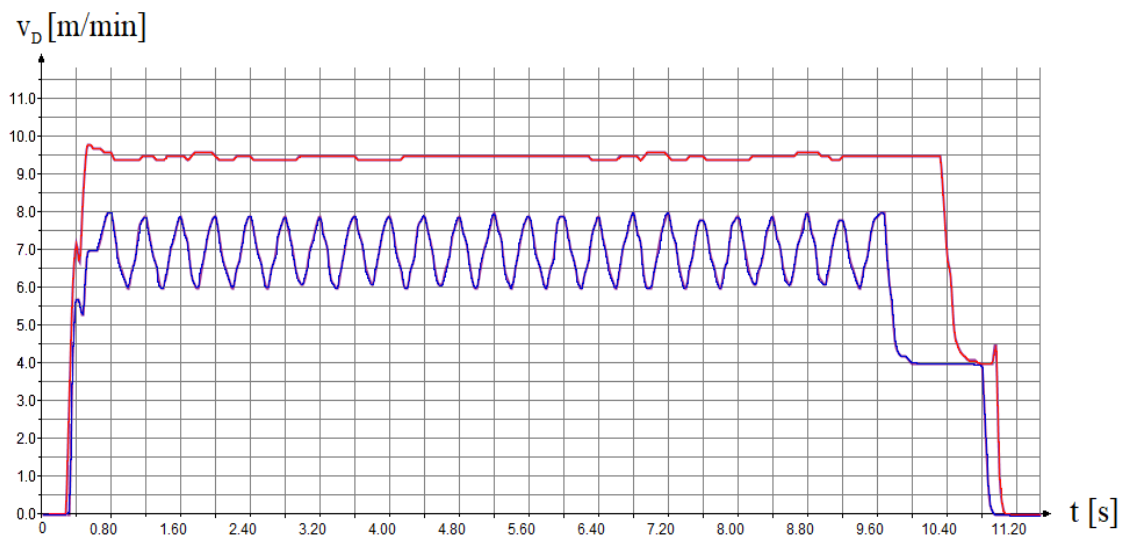


Obr. 33 Závislost napětí, proudů a směrů posuvu drátu na čase u procesu microMIG-CC [35].

MicroMIG a microMIG-CC přináší tyto výhody:

- díky redukovanému vnosu tepla jsou vhodné pro svařování tenkých plechů,
- menší deformace svarů,
- lze dobře kontrolovat množství vneseného tepla,
- dobré překlenutí mezer,
- tvorba vizuálně přívětivých svarů,
- svařovací rychlost srovnatelná se standardními MIG procesy. [35; 60]

Všechny zmíněné procesy se dají použít ve speciální úpravě označované DP (Dual Puls). Jedná se o periodické střídání dvou skupin parametrů během svařování, konkrétně jde o proměnlivou rychlost posuvu drátu a s ní související změnu ostatních parametrů. Střídající se rychlost drátu způsobuje kmitání svarové lázně, což má za následek snížení pórovitosti výsledného svaru. Dalšími efekty jsou hladší struktura povrchu svaru, lepší překlenutí mezer či zlepšení tečení svarové lázně. DP se dělí na dvě skupiny podle doby trvání kmitů. DP-Basic se pohybuje okolo frekvence 5-10 Hz. DP-Fast dosahuje frekvence kmitů až 50 Hz. Graf závislosti rychlosti posuvu drátu na čase na obr. 34 ukazuje rozdíl mezi procesem s DP funkcí a prostým procesem. [35; 60]



Obr. 34 Rozdíl rychlosti posuvu drátu mezi svařovacím procesem prostým a procesem s DP funkcí.

3 ODLAŽOVÁNÍ SVAŘOVACÍCH PROCESŮ

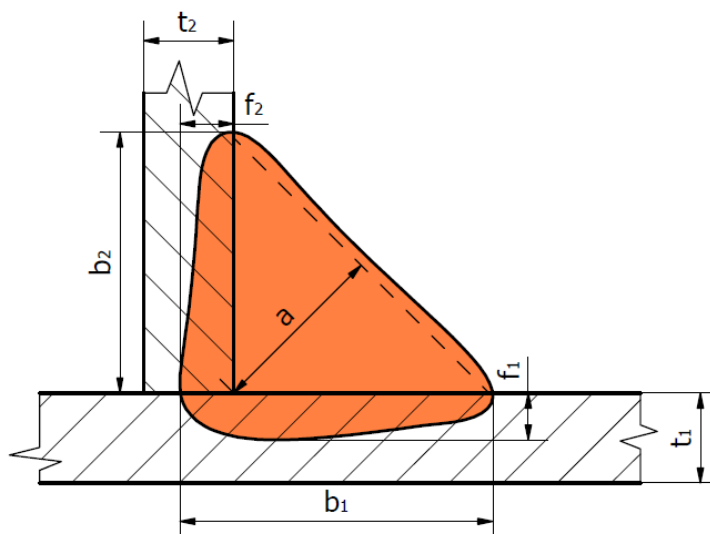
Experimentální část práce je rozdělena do dvou částí. Nejprve proběhlo odladění parametrů svařovacích procesů pro koutové a přeplátované spoje plechů tloušťek 3 a 5 mm, na kterých bylo ozkoušeno chování svařovacích procesů fy SKS Welding. Odladění procesů na plechách ušetřilo náklady a čas potřebné pro přímé testování procesů na součásti bateriového boxu. Výsledkem první části jsou konkrétní svařovací parametry pro dané koutové a přeplátované spoje s následným ověřením kvality na základě metalografického hodnocení. V druhé části byly svařovací parametry odladěné na vzorcích použity pro nastavení vstupních hodnot svařovacích procesů koutových spojů části bateriového boxu. Poté byly tyto procesy odladěny tak, aby kvalita výsledných spojů vyhovovala požadavkům spolupracující firmy.

Odladování je chápáno jako proces, při němž jsou postupně měněny hodnoty parametrů ovlivňujících výslednou vizuální i makrografickou kvalitu svaru, na jehož konci jsou získány konkrétní hodnoty parametrů, jimiž lze zhotovit spoj vyhovující kvality. Mezi veličiny se řadí například rychlost posuvu drátu, rychlost svařování, hodnoty proudů, napětí, výlet drátu (stickout), úhel sklonu hořáku (tilt angle), úhel tlačení hořáku (push angle), průtok a druh ochranné atmosféry aj.

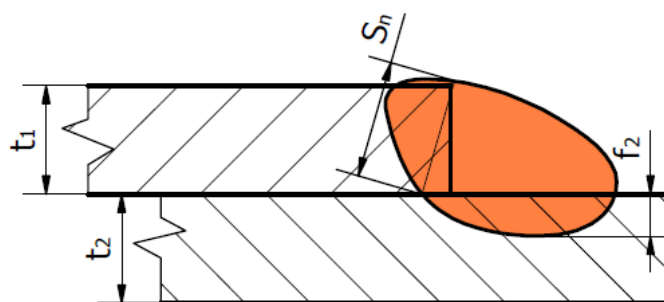
V experimentu byly parametry rozděleny na manuálně nastavované, které byly definovány přímo obsluhou mimo prostředí svařovacího kontroloru – výlet drátu, úhly tlačení a sklonu hořáku a rychlost svařování. Zbývající parametry byly nastavovány prostřednictvím svařovacího kontroloru.

Při odladování bylo prvním úkolem najít parametry, pomocí nichž byl zhotoven spoj vyhovující po vizuální stránce. Až po splnění této podmínky došlo k hodnocení makrostruktury a doladění parametrů, které zaručily celkově vyhovující kvalitu svaru. Zmíněný postup odladování je firmou u robotického svařování aplikován namísto využití předem definovaných parametrů svařování z pWPS. Výchozí hodnoty parametrů pro optimalizaci byly zvoleny z interní aplikace na jiné Al slitině.

Požadující kvalita svarů byla definována firmou dle interního předpisu a doplněna hodnocením kvality hliníkových svarů dle normy ČSN EN ISO 10042. Na následujících obrázcích 35 a 36 je znázorněna geometrie koutového, respektive přeplátovaného svaru a hodnocené rozměry. V tabulce 8 jsou zahrnuty základní požadavky na kvalitu přeplátovaných a koutových svarů hodnocenou makroskopickou zkouškou na metalografických výbrusech.



Obr. 35 Geometrie koutového spoje.



Obr. 36 Geometrie přelátovaného spoje.

Tab. 8 Požadavky na kvalitu svarů.

přelátovaný spoj	koutový spoj
$t_{\min} = \min(t_1; t_2)$	$t_{\min} = \min(t_1; t_2)$
100% natavení hrany horního plechu	$b_1, b_2 \geq t_{\min}$
$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2$	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 ; f_2 \geq 0,2 \cdot t_2$
$S_n \geq t_{\min}$	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min}$
max. velikost póru $p_{\max} \leq 0,2 \cdot s_n$	max. velikost póru $p_{\max} \leq 0,2 \cdot a$
pórovitost max. 1 %	pórovitost max. 1 %
bez trhlin	bez trhlin, podřezání

Experimentální část práce byla vypracována v Experience centru společnosti AWL-Techniek CZ. Buňka centra (obr. 37) je vybavena šestiosým robotem FANUC ARC Mate 120iD osazeným hořákovým systémem Frontpull 8i, který zajišťuje vnitřní vedení přídavného drátu a plynové hadice. Drát je přiváděn z externí cívky systémem kladek, plyn je dopravován z tlakové lahve. Mozkem sestavy je procesor Q80, jenž nastavuje veškeré svařovací parametry v závislosti na zvoleném procesu. Energii dodává svařovací zdroj LSQ5.



Obr. 37 Buňka robotického svařování.

Pro svařování vzorků a reálného dílce byl použit stejný přídavný materiál a ochranný plyn. S ohledem na chemické složení a doporučení vhodnosti přídavného materiálu ke svařování metodou MIG byl podnikem zvolen drát ER5356 materiálu AlMg5 (EN AW-5019) průměru 1,2 mm (příloha 1). Jedná se o vhodný přídavný materiál pro svařování hliníkových slitin řady 5xxx i 6xxx [73]. Nutnost inertní ochranné atmosféry pro MIG svařování zaručil ochranný plyn Argon 4.6.

3.1 Postup svařování a vyhodnocování

Postupy svařování a vyhodnocování kvality spojů plechů a profilů se lišily pouze ve způsobech upnutí vzorků na svařovací stůl a v náročnosti vyhodnocování vzorků. Cesta od upnutí k hodnocení metalografických výbrusů se skládala z těchto kroků:

- 1. očištění vzorků a upnutí do správné polohy na svařovací stůl;
- 2. „teachování“ programu pro svaření vzorků robotem;
- 3. volby svařovacího procesu a nastavení požadovaných parametrů;
- 4. robotického svaření vzorků;
- 5. očištění svarů, popisu, nafocení, hodnocení vizuální kvality;
- 6. dělení;
- 7. broušení;
- 8. leptání;
- 9. fotografování;
- 10. makrografického hodnocení výbrusu.

K očišťování svarových ploch od mastnoty a nečistot byl před zahájením svařování použit aceton. Nebylo užito mechanického čištění kartáčem ani moření plechů před svařováním, ve firmě tento postup není využíván.

Teachování programu robota, upnutí dílců a samotný svařovací proces jsou řešeny v dalších kapitolách zvlášť pro testovací vzorky a sestavu profilů boxu. Po svaření byly spoje očištěny od nečistot vzniklých svařováním, vyfotografovány a posuzovala se jejich vizuální stránka. Pokud byly vizuálně přijatelné, následovala příprava k hodnocení makrografie. V případě nevyhovující vizuální kvality – výskytu povrchových trhlin, přetečení či podřezání svarů – byly opětovně zhotovovány spoje s pozměněnými svařovacími parametry, dokud nebylo dosaženo vizuálně přijatelného svaru.

Dělení svarů probíhalo na řezacím stroji Brillant 230 (obr. 38) pomocí rozbrušovacího kotouče 10S30 určeného k řezání neželezných kovů. Složený je z karbidů křemíku v pryskyřičné



Obr. 38 Řezací stroj Brillant 230.



Obr. 39 Rozřezané vzorky zalité směsí.

matrici. Svary byly rozřezány na vzorky o maximálních rozměrech $\varnothing 45 \times 25$ mm tak, aby mohly být vloženy do přípravků pro tvorbu brusných tablet, a odjehleny. Po umístění svarů do válečků došlo k jejich zalití metylakrylátovou směsí (obr. 39), skládající se z práškové pryskyřice a tvrdidla KEM 30 v poměru 2:1. Po několika minutách, když došlo k úplnému zatuhnutí směsi, byly tablety vyjmuty z přípravků a popsány, aby nemohly být zaměněny.

V další fázi byly vzorky broušeny a leštěny na stroji Saphir 550 (obr. 40). Tento stroj umožňuje zpracování až šesti vzorků v jednom cyklu. Lze nastavovat libovolné parametry procesu, kterými jsou velikost a směr otáčení hlavy stroje a spodního kotouče, excentricita hlavy, velikost přitlaku hlavy a zapnutí, či vypnutí chlazení. Na spodní kotouč jsou připevňovány brusné talíře dle požadované jemnosti broušení.

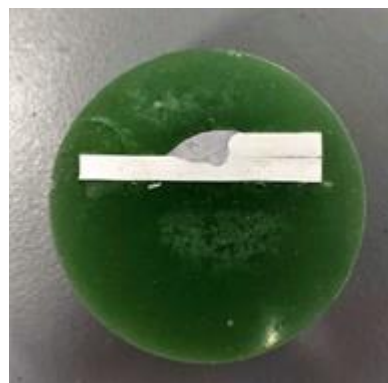
Broušení tablet probíhalo v několika cyklech, dokud nebylo dosaženo přijatelné jakosti povrchu výbrusu. U některých vzorků bylo nutno odebrat větší vrstvu materiálu, která vznikla nedostatečným přitisknutím vzorku ke dnu přípravku během zalévání směsí. V tomto případě byl proces broušení zdlouhavější, pro rychlejší odebrání vrstvy byla použita pásová bruska.

Na vybroušené vzorky byla následně na 3-5 minut aplikována tenká vrstva 7,5% roztoku NaOH, jenž způsobil naleptání výbrusu a vyniknutí kresby svaru. Následoval oplach a osušení vzorku. Příklad finálního výbrusu je vidět na obrázku 41.

Posledním krokem bylo nafocení a vyhodnocení vzorků za pomoci systému dhs Easy Controller EC26. Ten je složen ze světelného podsvícení, kamery a programu na kótování rozměrů fotografií. Vzorky jsou pokládány na průhlednou desku, která se nachází ve vzdálenosti ohniska čočky objektivu, díky čemuž je zaznamenaný obraz ostrý a je zaručeno konstantní zvětšení obrazu. Zjišťovány byly rozměry spojů dle tabulky 8 a také velikosti případných vad.



Obr. 40 Brousící stroj.



Obr. 41 Finální vzorek.

3.2 Svařování vzorků

Spolupracující firmou bylo požadováno otestovat chování procesů na plechách tak, aby následně mohl být vybrán vhodný proces spolu s konkrétními parametry pro svaření dílce bateriového boxu. S ohledem na tloušťky stěn profilu pohybující se v hodnotách od 3,8 mm do 5,3 mm byly pro testování zvoleny plechy tlouštěk 3 mm a 5 mm. Na základě interní příručky podniku byly pro testování použity procesy I-Pulse DP a KF-Pulse DP, které jsou doporučovány pro svařování tlouštěk větších než 2 mm [35]. Varianta procesů DP (Dual Puls) byla zvolena, jelikož v předchozích aplikacích byl ověřen pozitivní vliv periodické změny svařovacích parametrů na snížení pórovitosti svaru. Firma požadovala otestování procesů také pro přeplátované svary. Dle podkladů interní příručky byl pro odladění koutových spojů zvolen proces KF-Pulse DP a pro přeplátované spoje I-Pulse-DP.

Odladěný svařovací proces byl zaevidován s konkrétními svařovacími parametry, záznamem vizuální stránky spoje, okótovaným metalografickým výbrusem a tabulkou s naměřenými hodnotami parametrů porovnanými s nejnižšími přípustnými hodnotami. Pro přeplátované a koutové spoje byl v práci rozebrán jeden konkrétní příklad – spoje plechů o tloušťce 3 mm.

V kapitole 3.2.1 je popsáno odladění přeplátovaného spoje plechů, v kapitole 3.2.2 spoje koutového. Ostatní odladěné spoje jsou zaneseny v přílohách č. 2-5. Přehled požadovaných spojů k odladění je v tabulce 9.

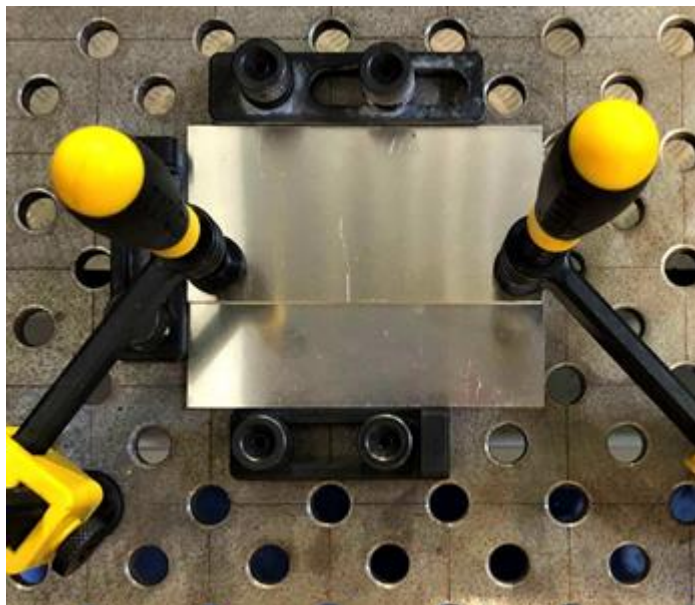
Tab. 9 Přehled požadovaných spojů k odladění.

proces – typ spoje	kombinace tloušťek plechů		
KF-Pulse DP – koutový spoj	3 / 3 mm	5 / 5 mm	3 / 5 mm
I-Pulse DP – přeplátovaný spoj	3 / 3 mm	5 / 5 mm	3 / 5 mm

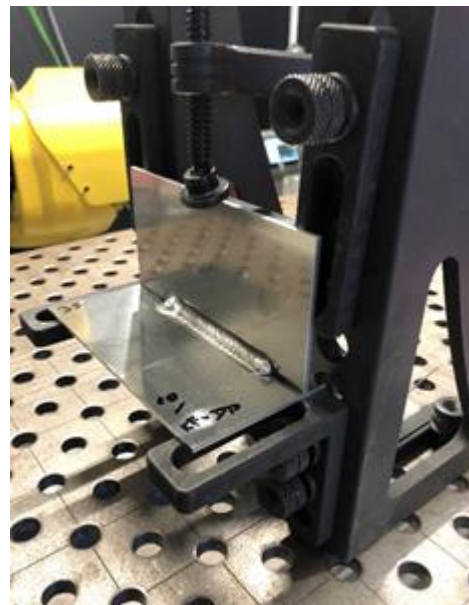
K testování svařovacích procesů byly dodány plechy o rozměrech 150x70x3 mm z materiálu EN AW-5754 H22 (AlMg3), jehož chemické složení a mechanické vlastnosti jsou vypsány v tabulkách 3 a 4. Stav materiálu H22 značí deformační zpevnění a částečné vyžhání. Plechy byly na potřebný rozměr děleny laserem.

Na svařovacím stole musela být vymezena pozice ustavení vzorků ke svařování. Bylo třeba zajistit, aby vždy byly plechy ve stejné pozici a pevně sevřeny. Bez řádného zajištění by mohlo vlivem pnutí během svařování dojít k jejich ohnutí a spoj by nebyl proveden správně. K zajištění polohy plechů posloužily u přeplátovaného spoje 2 šroubové svěrky, 3 dorazy a 6 čepů ze sestavy Siegmund, které byly upevněny do soustavy přesných děr stolu. Mezi stůl a spodní plech byla vložena podložka, jež zamezovala nadměrnému odvodu tepla (obr. 42).

Ustavení plechů pro koutový spoj bylo složitější. Musela být splněna podmínka tuhosti upnutí a také umožněn volný přístup hořáku po celé délce svaru. Proto byla nakonec zvolena varianta s využitím upínacích úhelníků, viz obr. 43.



Obr. 42 Ustavení plechů pro přeplátovaný spoj.



Obr. 43 Ustavení plechů pro koutový spoj.

Trajektorie pohybu robota byla definována několika body. Počátečním bodem byl tzv. „Home Point“. Před dosažením bodu počátku svařování (Weld Start) byly osy robota nastaveny tak, aby hořák svíral s deskou svařovacího stolu požadovaný úhel náklonu a také aby byl zajištěn odklon od roviny kolmé na svařované dílce pro zajištění tlčení svaru. Délka svaru 100 mm byla vymezena mezi počátečním a koncovým bodem (Weld End). Po ukončení svařování byl robot zavolán zpět do domovského bodu (Home Point).

Před započítím svařování bylo třeba zvolit svařovací proces a k němu nastavit příslušné parametry. V první fázi byly dány k dispozici hodnoty parametrů z interní databáze firmy, které se používají na plechy podobných tloušťek a materiálů. Dodané parametry se týkaly obecného nastavení svařovacího procesu. Bez nich by bylo velmi obtížné i pouhé zapálení oblouku vzhledem ke komplexnosti svařovacích procesů fy SKS Welding. Po svaření prvotních vzorků byla hodnocena vizuální kvalita, na základě které byly parametry upravovány.

Při odpovídající vizuální kvalitě bylo přistoupeno k rozřezání vzorku a hodnocení vnitřní kvality. Počty řezů a jejich umístění byly voleny dle interního předpisu firmy, dle něž byly zvoleny dva řezy, přičemž na délku svaru 100 mm vycházely řezy ve vzdálenosti 35 mm a 65 mm od počátku svaru. Z těchto dvou řezů byly vytvořeny metalografické výbrusy, z nichž se pro hodnocení kvality použil ten s horšími vlastnostmi. [74]

3.2.1 Přeplátované svary plechů tloušťky 3 mm

Pro svařování přeplátovaných spojů byl zvolen proces I-Pulse DP. Na svařovacím kontroloru Q80 byly ke zhotovení spoje P331 nastaveny parametry, viz obr. 44. Ostatní parametry byly zvoleny dle tab. 10.

Tab. 10 Manuálně nastavované parametry svařování spoje P331.

parametr	hodnota
rychlost svařování	12 mm·s ⁻¹
výlet drátu	15 mm
úhel sklonu hořáku	45°
úhel tlačení hořáku	10°

I-DP overlap 3,0mm		Start P2 P3 OFF END Unit							
99.999Ar G 00 T 08		Wire feed 1	12.0	8.0	10.0			5.0	m/min
Process I-Puls		SynchroWeld	OFF						
User Expert	Start parameter	Window width	0.0						±%
Operation mode Timer	Ignition filter 2.00 s	Voltage	25.2	21.4	22.6			18.0	V
AL 1-L	Start-Seq. 6.0 ms	Correction	3.0	1.4	1.4			0.0	V
Diameter 1.2 mm	I-Ignition 20 A	Pulse time	2.1	1.8	2.0			1.7	ms
99.999Ar	Wire in speed 1.0 m/min	Pulse current	290	290	290			270	A
Gas pre flow 0.70 s	Program parameter	Base current	80	70	80			30	A
Gas past flow 1.00 s	UpSlope 60.0 %	Welding current	140	114	128			90	A
Gas quantity 12.0 l/min	DownSlope 6.0 %	Char. (Auto)	3.56	4.40	3.92			5.56	V/100A
Miscellaneous	EndParameter	Release	ON	ON	ON			ON	
Mode Single wire	Burn back 2.0 mm	Program duration	0.8	0.2	0.2			1.0	s
Motor 1/2 Motor 1	End crater (P7) 1	Next program	Extern	P3	P2			Extern	
Lift Arc ON	Analog output 32.0 %	Analog output	4.0	8.0	12.0			28.0	%
Polwender OFF		Test AutoComp		ON	ON			ON	
Program Slope OFF		On AutoComp limit		STOP	STOP			STOP	
Start-Slope ON		AutoComp limit		3.0	3.0			3.0	V
DP Fast OFF		AutoComp filter	1.00						s
Master mode Master		On lost arc	STOP	STOP	STOP			STOP	
Arc release after ignition		Arc filter	0.50	0.50	0.50			0.50	s
Gas flow Don't test		Motor monitoring		ON	ON			ON	
Water pump OFF		Motor limit		3.0	3.0			3.0	A
Measure interval 0.10 s		Motor filter	2.00						s
Alarm time 2.00 s									

Obr. 44 Nastavení svařovacích parametrů kontroloru Q80 pro spoje P331 a P332.

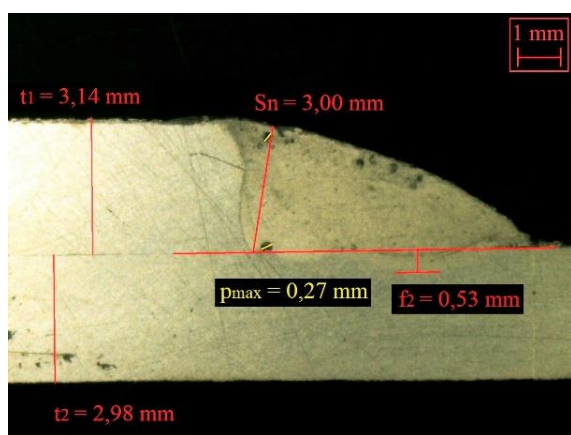
Svar P331 byl po vizuální stránce vyhovující (obr. 47), ale na snímku výbrusu byl naměřen nedostatečný průvar (obr. 45). Z vizuálního posouzení je vidět, že počáteční část svarové housenky je méně objemná než zbylá část svaru.

Pro svaření spoje P332 byly provedeny úpravy parametrů, viz tab. 11. Celkovým snížením svařovací rychlosti na 10 mm·s⁻¹ a přidavným zpomalením v počátku svaru došlo ke zvýšení

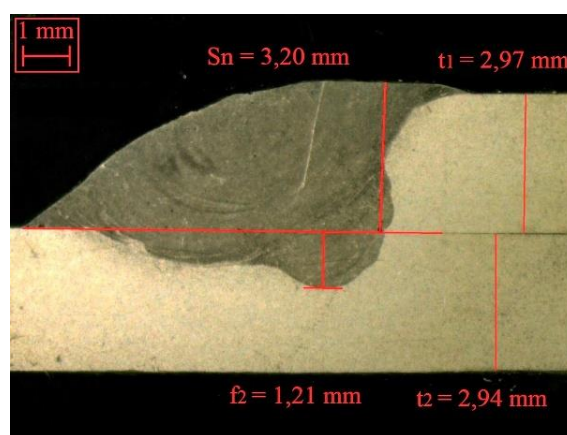
vneseného tepla, což se pozitivně projevilo na vizuální podobě spoje (obr. 48) a také zvýšením průvaru (obr. 46). Svarová lázeň díky vyššímu vnesenému teplu chladla pomaleji, a obsažené plyny z ní měly více času uniknout. Při porovnání výbrusů spojů P331 a P332 je zřetelná eliminace pórovitosti. Zvýšením úhlu tlačení na 15° došlo ke zlepšení čistoty povrchu svaru. V tabulkách 12 a 13 jsou porovnány naměřené hodnoty z maker s mezními hodnotami.

Tab. 11 Manuálně nastavované parametry svařování spoje P332.

parametr	hodnota
rychlost svařování	9 mm·s ⁻¹ počátečních 20 mm; 10 mm·s ⁻¹ zbytek délky
výlet drátu	15 mm
úhel sklonu hořáku	45°
úhel tlačení hořáku	15°



Obr. 45 Výbrus spoje P331.



Obr. 46 Výbrus spoje P332.



Obr. 47 Vizuální podoba spoje P331.



Obr. 48 Vizuální podoba spoje P332.

Tab. 12 Srovnání kvality spoje P331 s požadovanými podmínkami.

název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
hloubka průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 2,98 \geq 0,60$	$f_2 = 0,53$ mm	NOK
nejkratší úsečka [mm]	$s_n \geq t_{\min} \geq 2,98$	$s_n = 3,00$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot s_n \leq 0,2 \cdot 3,00 \leq 0,60$	$p_{\max} = 0,27$ mm	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK

Tab. 13 Srovnání kvality spoje P332 s požadovanými podmínkami.

název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
hloubka průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,20 \cdot t_2 \geq 0,20 \cdot 2,94 \geq 0,59$	$f_2 = 1,21$ mm	OK
nejkratší úsečka [mm]	$s_n \geq t_{\min} \geq 2,94$	$s_n = 3,20$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot s_n \leq 0,2 \cdot 3,20 \leq 0,64$	NENÍ	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK

3.2.2 Koutové svary plechů tloušťky 3 mm

Vstupní svařovací parametry pro proces KF-Pulse DP byly na kontroloru nastaveny dle výchozích parametrů z interní databáze firmy. Proces nebyl stálý, výsledný spoj K331 je na obr. 49. V dalších krocích byly upravovány rychlosti svařování, rychlosti posuvu drátů, délky výletů drátů, až se dosáhlo parametrů, jimiž byl svařen spoj K332, viz obr. 50. Tento svar nebyl vizuálně vyhovující v počáteční části housenky. Problém byl vyřešen sníženou rychlostí svařování v prvotní fázi procesu (spoj K333). Při makrografickém zkoumání bylo zjištěno nerovnoměrné provaření stěn (obr. 52). Pro vzorek K334 byly upraveny úhly hořáku na hodnoty, které jsou spolu s ostatními manuálně nastavovanými parametry zaneseny v tabulce 14. Svařovací parametry pro spoj K334 nastavené na kontroloru jsou zobrazeny na obr. 54. Podoba výsledného spoje je na obr. 51, makrografický výbrus na obr. 53. Naměřené rozměry jsou porovnány s požadovanými hodnotami v tabulce 15. Na základě vizuální a destruktivní zkoušky byl svar K334 hodnocen jako vyhovující.

Tab. 14 Manuálně nastavované parametry svařování spoje K334.

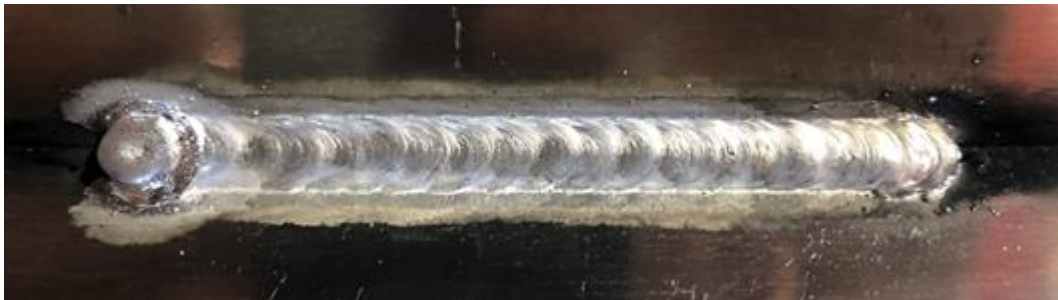
parametr	hodnota
rychlost svařování	9 mm·s ⁻¹ počátečních 20 mm; 10 mm·s ⁻¹ zbytek délky
výlet drátu	12 mm
úhel sklonu hořáku	45°
úhel tlačení hořáku	15°



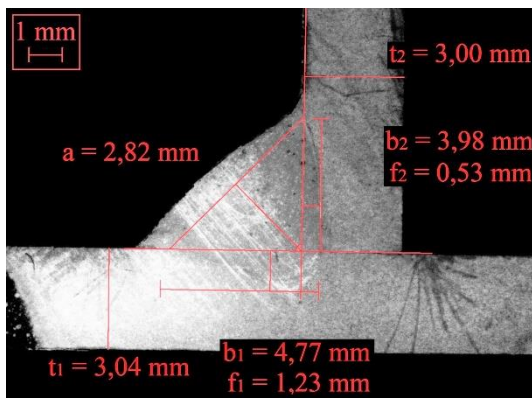
Obr. 49 Vizuální podoba spoje K331.



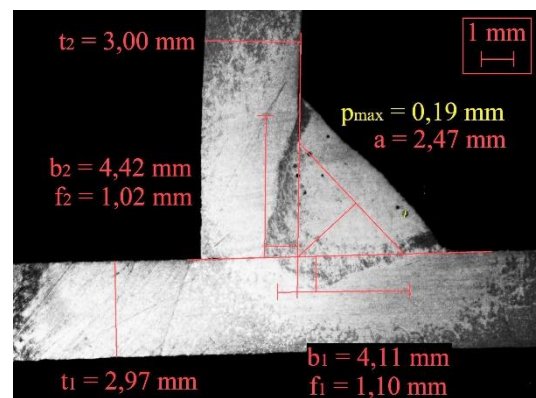
Obr. 50 Vizuální podoba spoje K332.



Obr. 51 Vizuální podoba spoje K334.



Obr. 52 Výbrus spoje K333.



Obr. 53 Výbrus spoje K334.

Tab. 15 Srovnání kvality spoje K334 s požadovanými podmínkami.

název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{min} \geq 3,00$	$b_1 = 4,78$ mm	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{min} \geq 3,00$	$b_2 = 4,26$ mm	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 3,02 \geq 0,60$	$f_1 = 1,17$ mm	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 3,00 \geq 0,60$	$f_2 = 1,04$ mm	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{min} \geq 0,7 \cdot 3,00 \geq 2,10$	$s_n = 2,79$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 2,10 \leq 0,42$	$p_{max} = 0,24$ mm	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK

KF-DP fillet 3,0mm		Start P2 P3 OFF END Unit							
99.999Ar G 01 T 20		Wire feed 1	8.0	6.0	8.0			4.0	m/min
Process KF-Puls		SynchroWeld OFF							
User Expert	Start parameter	Window width	0.0						±%
Operation mode Timer	Ignition filter 2.00 s	Pulse voltage	30.0	30.0	30.0			24.0	V
AL 1-L	Start-Seq. 7.0 ms	Field charact.	54.0	52.0	54.0			48.0	%
Diameter 1.2 mm	I-Ignition 20 A	Base current	80	50	70			20	A
99.999Ar	Wire in speed 3.0 m/min	Pulse time	1.9	1.7	1.9			1.6	ms
Gas pre flow 0.20 s	Program parameter	Base current time	6.3	7.5	5.0			25.0	ms
Gas past flow 1.00 s	KF Dynamics 0	Pulse frequency	122.0	108.7	144.9			37.6	Hz
Gas quantity 16.0 l/min	DownSlope 20.0 %	Release	ON	ON	ON			ON	
Miscellaneous	EndParameter	Program duration	1.0	0.2	0.2			1.5	s
Mode Single wire	Burn back 2.0 mm	Next program	Extern	P3	P2			Extern	
Motor 1/2 Motor 1	End crater (P7) 1	Analog output	4.0	8.0	12.0			28.0	%
Lift Arc ON	Analog output 32.0 %	On lost arc	STOP	STOP	STOP			STOP	
Polwender OFF		Arc filter	0.50	0.50	0.50			0.50	s
Program Slope OFF		Motor monitoring		ON	ON			ON	
Start-Slope ON		Motor limit		3.0	3.0			3.0	A
DP Fast OFF		Motor filter	2.00						s
Master mode Master									
Arc release after ignition									
Gas flow Don't test									
Water pump OFF									
Measure interval 0.04 s									
Alarm time 2.00 s									

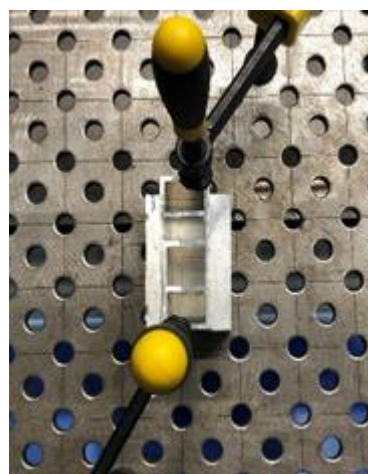
Obr. 54 Nastavení svařovacích parametrů kontroloru Q80 pro spoj K334.

3.3 Svařování součásti bateriového boxu

Sestava skládající se ze dvou profilů stejného průřezu byla z hlediska geometrického popsána v úvodním rozboru práce. Sestavení profilů a jejich geometrie jsou znázorněny na obrázcích 3 a 4. K odladění svařovacích procesů nebyla použita reálná pozice profilů v sestavě. Kdyby svařování probíhalo v přípravku, pro následné ověření kvality svarů makrografickou zkouškou by bylo potřeba celou sestavu rozřezat, a tedy znehodnotit. Z tohoto důvodu byly profily vyhrazené k testování nařezány na délku 60 mm tak, aby šlo proces odladit mimo přípravek na svařovacím stole v robotické buňce Experience centra.



a) s dorazy

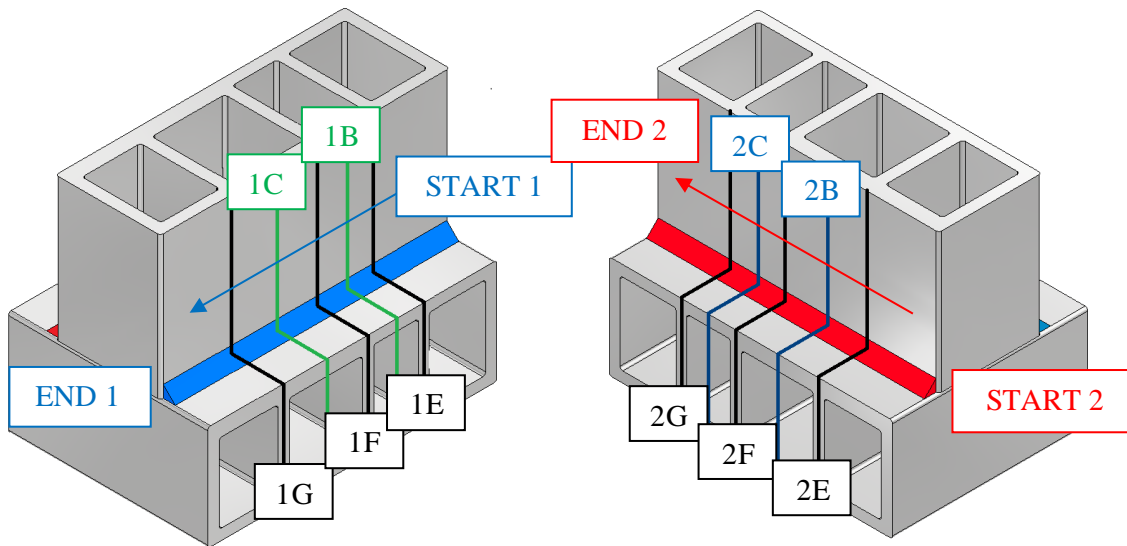


b) bez dorazů

Obr. 55 Vymezení polohy sestavy na svařovacím stole.

K tuhému uchycení profilů ke stolu bylo potřeba použít dvou upínek. Vymezení stálé polohy pro svařování bylo zajištěno sestavou dorazů, které se po zajištění pozice upínkami odstranily, viz obr. 55 a) a b). Upnutí dvěma upínkami bylo zvoleno jako nejvhodnější s ohledem na nutnost co největšího prostoru pro pohyb hořáku robota.

Při odladování svařovacích procesů byly aplikovány zkušenosti nabyté svařováním testovacích vzorků plechů. Profily byly spojeny dvěma svařovými housenkami, přičemž jejich pořadí a směr svařování jsou zobrazeny na obr. 56.



a) první svařová housenka

b) druhá svařová housenka

Obr. 56 Pořadí a směr tvorby spojů spolu s místy řezů pro metalografické hodnocení kvality.

Dráha robota byla vymezena pomocí bodů, podobně jako u svařování předchozích koutových vzorků. Byl předpoklad, že svařovací program spojů profilů bude oproti prostému koutovému a přeplátovanému spoji komplexnější, protože bylo třeba během svařování uvažovat několik faktorů, které měly vliv na výslednou kvalitu a geometrii svaru. Jednalo se o:

- úseky s výskytem žebér,
- různé tloušťky stěn profilů,
- předehřev druhé svařové housenky.

Prvotním hodnotícím požadavkem byla přijatelná vizuální kvalita obou svařových spojů. Na kvalitu počátečních a koncových částí spojů nebyl kladen důraz, jelikož se do budoucna počítá se svařováním jednoho obvodového spoje. Dokončení svaru není tak důležité, protože spoj bude svařován s přesazením počátku svaru. Pokud byly svary vizuálně v pořádku, přistoupilo se k rozřezání svařence. Zde byla hodnocena kvalita u každého svaru v pěti místech, ve dvou místech mimo žebra (B, C) a ve třech řezech žebry (E, F, G). Řezy byly označeny čísly 1 či 2 dle příslušnosti k danému svaru. Místa řezů jednotlivými svary včetně jejich označení jsou zakresleny na obr. 56. Jakost výbrusu byla hodnocena dle podmínek z tabulky 8. Tloušťky stěn profilů v jednotlivých řezech jsou pro přehlednost sepsány v tabulce 16. Tloušťka stěny vodorovně uloženého profilu je označena t_1 . Řezy 1F a 2F prochází žebry, v nichž se mění tloušťky sousedních stěn, proto je k hodnocení volena hodnota aritmetického průměru tlouštěk stěn.

Sklon hořáku (45°) a úhel tlačení (15°) byly na počátku nastaveny konstantní, ale předběžně se počítalo, že na základě výsledků metalografických výbrusů bude sklon hořáku upraven tak,

aby teplo směřovalo více do míst s menším průvarem. Dále byl předpoklad, že bude třeba měnit svařovací rychlosti a další parametry k dosažení požadované kvality spojů.

Tab. 16 Tloušťky stěn profilů v jednotlivých řezech svarů.

ŘEZ	t_1 [mm]	t_2 [mm]	ŘEZ	t_1 [mm]	t_2 [mm]
1B	3,9	3,8	2B	5,3	5,3
1C	5,3	3,8	2C	3,9	3,9
1E	3,9	3,8	2E	5,3	5,3
1F	4,6	3,8	2F	4,6	4,6
1G	5,3	3,8	2G	3,9	3,9

3.3.1 Postup odladění spojů

Pro prvotní svaření spoje profilů P1 byly zvoleny parametry, jež byly odladěny pro svar K334 na testovacích plechách tloušťky 3 mm. V tabulce 17 jsou zaneseny manuálně definované parametry a také důležité parametry nastavitelné na svařovacím kontroloru, u kterých byl předpoklad změny během odlaďovacího procesu. Konkrétně se jednalo o hodnotu posuvu drátu v počátku svařování a během dvou DP cyklů, dále o tři hodnoty základního proudu a také časy výdrže na základním proudu.

Svařen byl pouze první svar, jelikož již dle vizuálního hodnocení se jednalo o neprovařený spoj, viz obr. 57, a nemělo význam svařovat stejnými parametry spoj druhý. Pro další spoje bylo třeba zvýšit vnesené teplo.

Tab. 17 Parametry svařování spoje P1.

parametr	hodnota		
rychlost svařování	10 mm·s ⁻¹		
výlet drátu	12 mm		
úhel sklonu hořáku	45°		
úhel tlačení hořáku	15°		
	počátek	1. cyklus	2. cyklus
rychlost posuvu drátu [m·min ⁻¹]	8	6	8
základní proud [A]	80	50	70
čas základního proudu [ms]	6,3	7,5	5,0



Obr. 57 Spoj P1.

Druhý svařenec P2 byl zhotoven pomocí parametrů, kterými byl svařován spoj testovacích plechů tloušťky 5 mm, viz příloha 5. Pro obě svarové housenky P2-1 a P2-2 byly zvoleny stejné parametry podle tabulky 18.

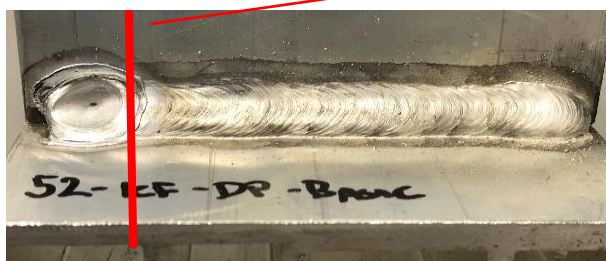
Tab. 18 Parametry svařování spojů P2-1 a P2-2.

parametr	hodnota		
rychlost svařování	9 mm·s ⁻¹ počátečních 20 mm; 10 mm·s ⁻¹ zbytek délky		
výlet drátu	12 mm		
úhel sklonu hořáku	45°		
úhel tlačení hořáku	15°		
	počátek	1. cyklus	2. cyklus
rychlost posuvu drátu [m·min ⁻¹]	10	11	13
základní proud [A]	100	80	80
čas základního proudu [ms]	3,2	6,8	5,8

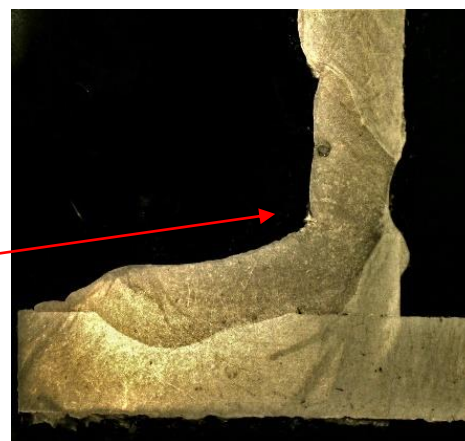
Spoje byly vizuálně téměř vyhovující. Z obr. 58 je patrná nerovnoměrná geometrie prvního svaru. K té došlo vlivem nepřesného určení bodů v trajektorii robota. U druhého spoje nastal problém v koncové části housenky, kdy vlivem přílišného vneseného tepla došlo k provaření stěny kolmého profilu. Tento nedostatek se vyskytl těsně za žebrem v místě řezu 2G. Úplný průvar stěny je podložen metalografickým výbrusem, viz obr. 60. Pro eliminaci problému bylo pro následující krok odladováno redukováno vnesené teplo při svařování druhého spoje.



Obr. 58 Spoj P2-1.



Obr. 59 Spoj P2-2.

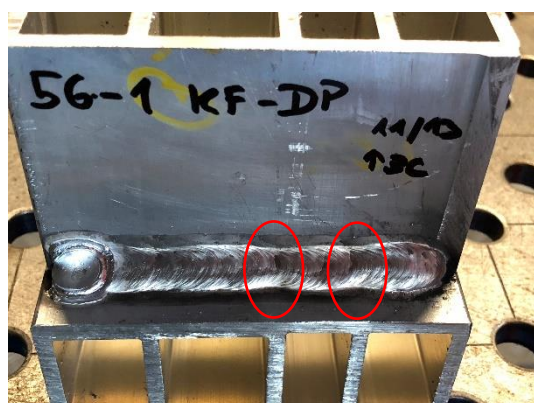


Obr. 60 Výbrus spoje P2-2 v místě 2G.

Spojení následujícího svařence P3 bylo provedeno pomocí spojů o rozdílných parametrech. První spoj P3-1 byl svařen se stejnými parametry jako P2-1, resp. P2-2. Pro druhý svar byly poníženy hodnoty rychlosti posuvu drátu a hladina základního proudu. Díky předehřevu profilů od tepla prvního spoje byl předpoklad, že pro dosažení průvarů nebude nutné vnést stejné teplo jako pro první spoj. Parametry svařování jsou v tabulce 19. Dále došlo ke zpřesnění trajektorie robota přeucením bodů svařovací cesty.

Tab. 19 Parametry svařování spojů P3-1 a P3-2.

parametr	hodnota		
rychlost svařování	9 mm·s ⁻¹ počátečních 20 mm; 10 mm·s ⁻¹ zbytek délky		
výlet drátu	12 mm		
úhel sklonu hořáku	45°		
úhel tlačení hořáku	15°		
1. spoj	počátek	1. cyklus	2. cyklus
rychlost posuvu drátu [m·min ⁻¹]	10	11	13
základní proud [A]	100	80	80
čas základního proudu [ms]	3,2	6,8	5,8
2. spoj	počátek	1. cyklus	2. cyklus
rychlost posuvu drátu [m·min ⁻¹]	10	10	12
základní proud [A]	90	70	70
čas základního proudu [ms]	3,2	6,8	5,8



Obr. 61 Spoj P3-1.



Obr. 62 Spoj P3-2.

Svary P3-1 a P3-2 měly dle vizuálního zkoušení problematická místa zaznačená v červených kroužcích na obr. 61 a 62. V těchto místech došlo ke snížení průřezu svarů vlivem přílišného odvodu tepla kvůli vyskytujícím se žebřům. V koncové části druhého spoje nenastal úplný průvar stěny, snížení parametrů tedy pomohlo. Následovalo rozřezání v místech mimo žebra (1B, 1C, 2B, 2C) a kontrola kvality metalografickým výbrusem. Naměřené hodnoty průvarů včetně požadavku na minimální průvar jsou znázorněny v tabulce 20. Fotografie okótovaných výbrusů spojů v daných řezech jsou přiloženy v příloze 6. Je z nich patrné, že v koncové části prvního spoje a počáteční části spoje druhého nebylo dosaženo potřebných průvarů.

Tab. 20 Hodnocení průvarů v řezech mimo žebra u spojů P3-1 a P3-2.

ŘEZ	min. f ₁ [mm]	min. f ₂ [mm]	f ₁ [mm]	f ₂ [mm]	NOK/OK
P3-1B	0,77	0,76	0,88	1,91	OK
P3-1C	1,06	0,75	0,65	1,21	NOK
P3-2B	1,07	1,07	0,63	0,74	NOK
P3-2C	0,78	0,78	0,90	1,01	OK

Pro zvýšení hodnot průvarů byla snížena rychlost svařování u obou následujících spojů P4-1 a P4-2. Dále byly mírně zvednuty nastavené hodnoty základních proudů u jednotlivých částí procesu, viz tab. 21. Aby byly konce spojů ochráněny od nadměrného provaření, byly vypnuty parametry pro vyplňování koncových částí spojů (End Crater Filling), které sice přispívaly k lepšímu zakončení svarů, ale vnášely do procesu nadměrné množství tepla, zejména u druhé housenky, což nebylo žádoucí. Jelikož odladění koncových částí spojů nebylo požadováno, mohla být skupina parametrů pro dokončení svaru vypnuta.

Tab. 21 Parametry svařování spojů P4-1 a P4-2.

parametr	hodnota		
rychlost svařování	1. spoj 6/7 mm·s ⁻¹	2. spoj 7/8 mm·s ⁻¹	
výlet drátu	12 mm		
úhel sklonu hořáku	45°		
úhel tlačení hořáku	15°		
1. spoj	počátek	1. cyklus	2. cyklus
rychlost posuvu drátu [m·min ⁻¹]	11	11	13
základní proud [A]	100	90	90
čas základního proudu [ms]	4,0	7,5	5,8
2. spoj	počátek	1. cyklus	2. cyklus
rychlost posuvu drátu [m·min ⁻¹]	11	10	12
základní proud [A]	100	80	80
čas základního proudu [ms]	3,2	6,8	5,8

Spoje byly rozřezány v místech mimo žebra, naměřené průvary na metalografických výbrusech jsou znázorněny v tabulce 22. Snímky výbrusů jsou v příloze 7. Hodnoty průvarů z většiny vyhovují požadavkům, pouze v řezu 2B bylo třeba upravit geometrii hořáku, aby bylo teplo více koncentrováno do kolmé stěny. Na konci druhého spoje byl naměřen vysoký průvar, proto bylo v následujících krocích potřeba kontrolovat, aby nedošlo k úplnému provaření plechů, a výrazně nenavýšovat množství vneseného tepla. Mimo žebra bylo 7 z 8 průvarů hodnoceno jako vyhovující, a proto se další fáze odladování zaměřila na dosažení průvarů v žebrech.

Tab. 22 Hodnocení průvarů v řezech mimo žebra u spojů P4-1 a P4-2.

ŘEZ	min. f ₁ [mm]	min. f ₂ [mm]	f ₁ [mm]	f ₂ [mm]	NOK/OK
P4-1B	0,78	0,75	2,01	1,33	OK
P4-1C	1,06	0,76	1,10	1,18	OK
P4-2B	1,07	1,06	2,91	0,93	NOK
P4-2C	0,78	0,78	1,60	3,41	OK

Pro svaření spojů P5-1 a P5-2 bylo potřeba vnést více tepla, aby došlo k provaření i v místech se žebry, kde byl zvýšený odvod tepla do materiálu. Vhodným prostředkem se jeví snížení rychlosti svařování s ohledem na významný efekt na velikost provaření. Dále byl prodloužen výlet drátu na hodnotu 14 mm a čas základního proudu, aby oblouk hořel blíže svarové lázni. Parametry svařování jsou v tabulce 23.

Tab. 23 Parametry svařování spojů P5-1 a P5-2.

parametr	hodnota		
rychlost svařování	1. spoj 5/6 mm·s ⁻¹	2. spoj 6/8 mm·s ⁻¹	
výlet drátu	14 mm		
úhel sklonu hořáku	45°		
úhel tlačení hořáku	15°		
1. spoj	počátek	1. cyklus	2. cyklus
rychlost posuvu drátu [m·min ⁻¹]	11	11	13
základní proud [A]	100	90	90
čas základního proudu [ms]	4,0	8,0	7,0
2. spoj	počátek	1. cyklus	2. cyklus
rychlost posuvu drátu [m·min ⁻¹]	11	10	12
základní proud [A]	100	80	80
čas základního proudu [ms]	4,0	8,0	7,0

Při vizuálním hodnocení spojů (obr. 63 a 64) byly patrné nadměrně převýšené počáteční části spojů způsobené sníženou svařovací rychlostí v těchto místech. Dále u spoje P5-1 v místě 1F došlo k výraznému zúžení housenky způsobenému zvýšeným odvodem tepla kvůli přítomnosti žebra. V místě 1G je zúžení též patrné, ovšem není tak výrazné. Druhá polovina spoje P5-2 je z důvodu vyšší rychlosti svařování užší než první část.



Obr. 63 Detail spoje P5-1.



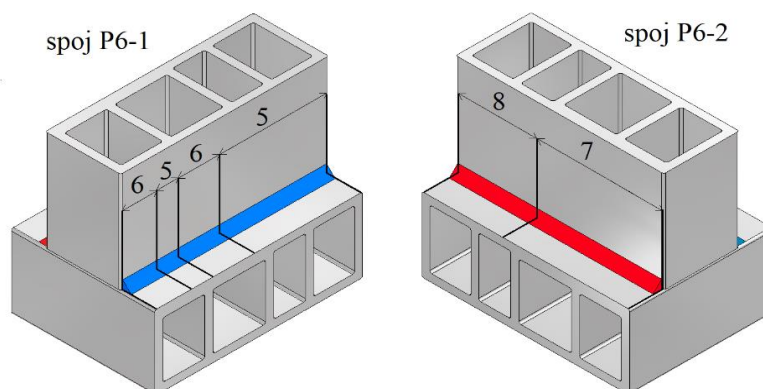
Obr. 64 Detail spoje P5-2.

Byly provedeny řezy spojů skrze žebra a vytvořeny jejich metalografické výbrusy. Z tabulky 24 vyplývá, že v žebrech nejbliže počátkům svarů (1E a 2E) nejsou vyhovující hodnoty průvarů. V řezech 1F a 1G skrze žebra u prvního spoje by bylo vhodné 3 ze 4 průvarů zvýšit, proto bude v následujícím kroku přistoupeno k úpravě parametrů. Výbrusy spojů P5-1 a P5-2 řezaných skrze žebra jsou v příloze 8.

Tab. 24 Hodnocení průvarů v řezech skrze žebra u spojů P5-1 a P5-2.

ŘEZ	min. f_1 [mm]	min. f_2 [mm]	f_1 [mm]	f_2 [mm]	NOK/OK
P5-1E	0,78	0,76	0,82	0,92	NOK
P5-1F	0,92	0,76	1,12	0,85	OK
P5-1G	1,06	0,76	1,21	1,18	OK
P5-2E	1,06	1,06	0,79	2,19	NOK
P5-2F	0,92	0,92	1,28	1,41	OK
P5-2G	0,78	0,78	1,52	1,90	OK

Ke svaření spojů P6-1 a P6-2 byly upraveny následující parametry. Aby bylo dosaženo lepší vizuální stránky svarů, došlo v počáteční fázi ke zvýšení rychlosti svařování. Propadnutí svaru v místě 1F z předchozího kroku bylo plánováno eliminovat snížením rychlosti v tomto místě. Konkrétně jsou svařovací rychlosti zvolených úseků u spojů P6-1 a P6-2 znázorněné na obrázku 65. Čísla jsou dána v $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Dále byly zvýšeny hodnoty základních proudů pro jeden z cyklů svařování ve snaze kompenzovat úbytek vneseného tepla způsobený zrychlením svařování. Základní parametry nastavené pro spoje P6-1 a P6-2 jsou v tabulce 25, kompletní nastavení svařovacího zdroje je v příloze 9.



Obr. 65 Nastavené svařovací rychlosti spojů P6-1 a P6-2.

Tab. 25 Parametry svařování spojů P6-1 a P6-2.

parametr	hodnota		
výlet drátu	14 mm		
úhel sklonu hořáku	45°		
úhel tlačení hořáku	15°		
1. spoj	počátek	1. cyklus	2. cyklus
rychlost posuvu drátu [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	11	11	13
základní proud [A]	100	90	100
čas základního proudu [ms]	4,0	8,0	7,0
2. spoj	počátek	1. cyklus	2. cyklus
rychlost posuvu drátu [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	11	10	12
základní proud [A]	100	80	90
čas základního proudu [ms]	4,0	8,0	7,0

Vizuální podoba svarů je zdokumentována na obrázcích 66 a 67. Snížením rychlosti procesu bylo dosaženo redukce propadnutí geometrie spoje P6-1 v místě 1F a převýšení počátků obou spojů. Z tabulky 26 s vyhodnocením naměřených průvarů spojů v žebrech profilů je vidět, že byla splněna podmínka jejich minimálních velikostí. Vyhovující byly taktéž průvary a celková kvalita spojů v řezech mimo žebra (1B, 1C, 2B, 2C). Kvalita spojů je doložená na metalografických výbrusech, které jsou zaneseny v příloze 10 spolu s tabulkami hodnotícími jejich kvalitu.



Obr. 66 Detail spoje P6-1.



Obr. 67 Detail spoje P6-2.

Tab. 26 Hodnocení průvarů v řezech skrze žebra u spojů P6-1 a P6-2.

ŘEZ	min. f_1 [mm]	min. f_2 [mm]	f_1 [mm]	f_2 [mm]	NOK/OK
P6-1E	0,78	0,76	0,91	1,87	OK
P6-1F	0,92	0,76	1	1,09	OK
P6-1G	1,06	0,76	1,3	1,46	OK
P6-2E	1,06	1,06	1,15	2,03	OK
P6-2F	0,92	0,92	1,11	1,94	OK
P6-2G	0,78	0,78	1,23	1,97	OK

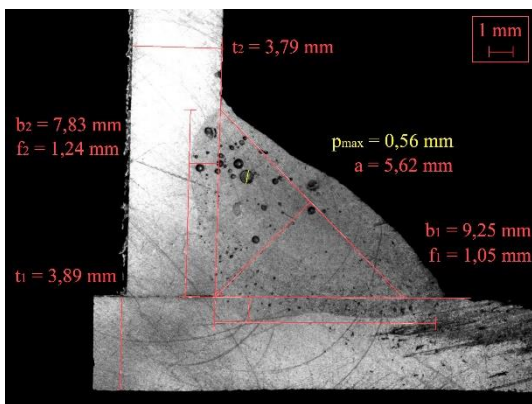
3.3.2 Konečné zhodnocení

Pro svaření profilů bylo provedeno odladění, jehož výsledky jsou viditelné na spojích P6-1 a P6-2. Svary byly zhotoveny pomocí procesů KF-Pulse DP se svařovacími parametry nastavenými podle tabulky 25 a přílohy 9. Vizuálně jsou spoje hodnoceny jako vyhovující. Metalografickými výbrusy byla ověřena kvalita v deseti hodnocených řezech. V těchto místech je kvalita svarů vyhovující dle podmínek daných spolupracující firmou definovaných v tabulce 8. Okótované snímky výbrusů jsou k nalezení v příloze 10, kde je pro každý jeden

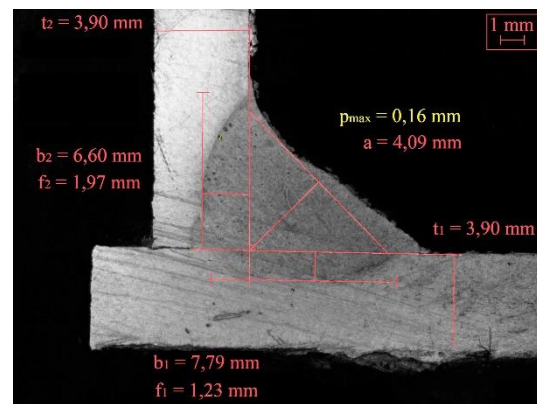
provedeno zhodnocení splnění požadavků ve formě tabulky. Svary i přesto nejsou ideální a v několika směrech by mohly být lepší.

V tabulkách jsou některé hodnoty zaznačeny žlutým podkladem. Jedná se o parametry, které by mohly být dále upravovány pro dosažení lepší geometrie spojů. Konkrétně jde o pórovitost v řezu prvního spoje 1B (obr. 68), která je při porovnání s ostatními makrografickými snímky nejvyšší. Příčinou bylo malé prohřátí materiálu v počáteční fázi svařování. Pórovitost se vyskytuje u většiny z řezů, ale je patrné, že s postupující vzdáleností řezu se její množství snižuje, načež v koncové části druhého svaru je pórovitost téměř nulová, jak je ukázáno na obr. 69.

V řezech 1E, 2B, 2E a 2F byl naměřen průvar stěn spodního profilu mezi 8-20 % nad minimální povolený rozměr. Nižší průvary mohly být způsobeny vlivem většího odvodu tepla vodorovně uloženým profilem, jelikož byl v kontaktu se svařovacím stolem a odváděl rychleji teplo. K ověření domněnky by bylo vhodné svařit odladěnými procesy součást přímo v sestavě. Pro zaručení vyššího průvaru stěny t_1 by případně pomohlo snížení úhlu sklonu hořáku.



Obr. 68 Výbrus spoje P6-1 v řezu 1B.



Obr. 69 Výbrus spoje P6-2 v řezu 2G.

Na makrografických výbrusech prvního spoje je viditelné, že by bylo vhodné pro lepší geometrii spojů vnést více tepla pro větší provaření kořene. V kontaktu plechů u kořene nejsou viditelné trhliny, ale pro zcela vyhovující geometrii by měl být kořen lépe provařený. Zvyšováním množství tepla vneseného do svaru během odladování nebyl pozorován významný rozdíl v průvaru kořenů, řešením by mohlo být použití drátu většího průměru. Druhý spoj je z hlediska provaření kořene plně vyhovující.

ZÁVĚR

V první části práce byla provedena rešerše na rozdělení, vlastnosti a možnosti použití hliníkových slitin. Byla popsána problematika jejich svařitelnosti včetně popisu možných metod použitelných pro robotické svařování. Podrobněji bylo rozebráno robotické MIG svařování za použití aparatury firmy SKS Welding a robota od fy FANUC. Aparatura byla popsána včetně možných svařovacích procesů aplikovatelných na MIG svařování, u robota byly shrnuty základy programování.

Cílem experimentální části bylo odladit procesy a roboticky svařit vzorky svarů s následným zhodnocením jejich kvality metalografickým rozborem. Požadavkem spolupracující firmy bylo odladit procesy pro zhotovení dvou koutových spojů na části svařence bateriového boxu. Svařenec byl složen z protlačovaných profilů materiálu EN AW-6061 T6 komplikovaného průřezu s žebry a nerovnoměrnou tloušťkou stěn. Ke svařování byl použit zdroj LSQ5 a robot FANUC ArcMate 120iD. Jako přídatný materiál byl zvolen drát AlMg5 o průměru 1,2 mm. Jako ochranný plyn byl vybrán Argon 4.6.

Nejprve bylo testováno chování a vlastnosti svařovacích procesů KF-Pulse DP a I-Pulse DP na prostých koutových a přeplátovaných spojkách plechů tlouštěk 3 a 5 mm z materiálu EN AW-5754 H22. Testování procesů na plechách bylo zvoleno z důvodu úspory materiálu a rychlosti evaluace pro základní nastavení parametrů procesů. Ke svařování přeplátovaných spojů byl použit proces I-Pulse DP, pro koutové spoje KF-Pulse DP. Kvalita spojů zhotovených odladěnými procesy byla ověřena vizuální zkouškou a metalografickými výbrusy dle požadavků firmy.

Parametry odladěných procesů KF-Pulse DP byly vybrány jako vstupní pro nastavení svařovacích procesů spojů profilového svařence. Proces optimalizace byl popsán šesti kroky, při nichž byla postupně dosažena vizuální kvalita, provaření v místech spojů mimo žebra a následně i v místech s žebry. Požadovaná kvalita výsledných spojů P6-1 a P6-2 je podložena vizuálním hodnocením a metalografickými výbrusy řezů spojů požadovanými místy.

Předepsaná kvalita byla dosažena proměnnou svařovací rychlostí a nastavením vhodných hodnot rychlostí posuvů drátů, základního proudu aj. Průvary ve všech ověřovaných místech přesahují minimální požadované rozměry. U prvního spoje jsou průvary nižší než u spoje druhého, který již byl přehřátý. V místech výskytu žebor jsou průvary celkově nižší vlivem vyššího odvodu tepla. Pórovitost svarů byla redukována, ale nepodařilo se ji eliminovat.

Finální doladění proběhne až při založení součásti do svařovacího přípravku. Je možné, že spoje při svaření dle odladěných parametrů budou vlivem vyššího odvodu tepla dosahovat průvarů nižších hodnot, v tom případě bych doporučil zvolit přídatný drát většího průměru, například 1,6 mm, a svařovací parametry upravit. Rozdíly v geometrii a kvalitě spojů při použití drátů o průměrech 1,2 mm a 1,6 mm by se mohla zabývat některá z budoucích diplomových prací.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro mezinárodní/eurospké svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. Brno: Odbor svařování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2016, 272 s.
 2. AROWOSOLA, Ayomipo a Gabrielle GAUSTAD. Estimating increasing diversity and dissipative loss of critical metals in the aluminum automotive sector. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2019, 150 [cit. 2023-03-01]. ISSN 09213449. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.016>
 3. KHADEMIAN, Nima a Yaser PEIMAI. Magnesium alloys and applications in automotive industry. *5th International Conference on Science and Development of Nanotechnology* [online]. 2021 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/354102981_Magnesium_alloys_and_applications_in_automotive_industry
 4. CROWE, Stewe. ABB acquiring AB Rotech to Bolster Automotive Robotic Welding. In: *The Robot Report* [online]. WTWH Media, 2018-07-11 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://www.therobotreport.com/abb-acquiring-ab-rotech-robotic-welding/>
 5. Electric Vehicle Battery Box. *Aluminum Extruders Council* [online]. Aluminum Extruders Council, c2023 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://aec.org/page/electric-vehicle-battery-box>
 6. ČSN EN 573-3+A1. *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 3: Chemické složení a druhy výrobků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023. Třídící znak 42 1401.
 7. ČSN EN 485-2+A1. *Hliník a slitiny hliníku – Plechy, pásy a desky – Část 2: Mechanické vlastnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019. Třídící znak 42 4081.
 8. MIKEŠ, David. *Doplnění rozboru práce* [elektronická pošta]. Message to: saloja@email.cz. 3. března 2023 10:25 [cit. 2023-03-05]. Osobní komunikace
 9. MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
 10. Aluminium. *Royal Society of Chemistry* [online]. Royal Society Of Chemistry, c2022 [cit. 2022-10-10]. Dostupné z: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/13/aluminium>
 11. PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
 12. DAVIS, Joseph R. Aluminium and Aluminium Alloys. In: *Alloying: Understanding the Basics* [online]. ASM International, 2001, s. 351-416 [cit. 2023-01-20]. ISBN 978-0-87170-744-4. Dostupné z: <https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/173/Aluminum%20and%20Aluminum%20Alloys%20Davis.pdf>
 13. ČSN EN 573-1. *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 1: Číselné označování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005. Třídící znak 42 1401.
-

-
14. ČSN EN 1780-1. *Hliník a slitiny hliníku – Označování slitinových hliníkových ingotů pro přetavení, předslitin a odlitků – Část 1: Číselné označování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003. Třídící znak 42 1402.
 15. Product. *Auto Aluminum Sheet* [online]. Haomei Aluminum, c2023 [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: <https://www.autoaluminumsheet.com/product>
 16. KAPRANOS, Platon. Thixoforming A201 aluminium alloy: Is there a future in aerospace applications? *Metallurgia Italiana* [online]. 2021, 104, 25-29 [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/228808332.pdf>
 17. POZNAK, Alex, Daniel FREIBERG a Paul SANDERS. Automotive Wrought Aluminium Alloys. In: *Fundamentals of Aluminium Metallurgy* [online]. Elsevier, 2018, 2018, s. 333-386 [cit. 2023-01-12]. ISBN 9780081020630. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102063-0.00010-2>
 18. JULIŠ, Martin. *Neželezné kovy I. – slitiny Al* [přednáška]. Brno: VUT, 2022-04-12.
 19. ČSN EN 515. *Hliník a slitiny hliníku – Výrobky tvářené – Označování stavů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. Třídící znak 42 0053.
 20. YE, Ronan. Everything You Need to Know About Anodizing Aluminum. In: *3ERP* [online]. 3E Rapid Prototyping, 2018-06-29, [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <https://www.3erp.com/blog/everything-about-anodizing-aluminum/>
 21. Eloxování a moření hliníku. *Galvena* [online]. Galvena [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <https://www.galvena.cz/eloxovani-a-moreni-hliniku>
 22. OFOEGBU, U. Stanley, Fábio A. O. FERNANDES a António B. PEREIRA. The Sealing Step in Aluminum Anodizing. In: *Finishing & Coating* [online]. finishingandcoating.com, 2022-08-08 [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <https://finishingandcoating.com/index.php/anodizing/1220-the-sealing-step-in-aluminum-anodizing>
 23. PATEL, Neel. What is Aluminum Anodizing? In: *Medical Design & Outsourcing* [online]. WTWH Media, 2019-10-11 [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <https://www.medicaldesignandoutsourcing.com/what-is-aluminum-anodizing/>
 24. Passenger Vehicle Body. *Auto Aluminum Sheet* [online]. Haomei Aluminum, c2023 [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: <https://www.autoaluminumsheet.com/passenger-vehicle-body>
 25. CARLEY, Larry. Machining Aluminum Engine Blocks. In: *Engine Builder* [online]. Babcox Media, 2017-07-27 [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: <https://www.enginebuildermag.com/2017/07/machining-aluminum-engine-blocks/>
 26. MONTIJO, Sara. Aluminum in Cars: What Aluminum Alloys are Common in Aluminum Car Bodies?. In: *Kloeckner metals* [online]. Kloeckner Metals Corporation, 2021-07-07 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.kloecknermetals.com/blog/aluminum-in-cars/>
 27. Aluminum Alloy Sheets for Automobile Panels. *UACJ* [online]. UACJ Corporation, c2023 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.uacj.co.jp/english/products/sheeting/aas-panel>
-

-
28. PADMANABAN, D. Anantha a Kurien GULSHAN. Silumins: The Automotive Alloys. In: *Advanced Materials & Processes*, 2012, 170(3), 28+ [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.asminternational.org/c/portal/pdf/download?articleId=AMP17003P28&groupId=10192>
 29. Cast aluminum wheels. *Aluminium Guide* [online]. aluminium-guide.com, c2013-2022 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://aluminium-guide.com/en/litye-kolesnye-diski/>
 30. KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
 31. Welding of aluminum rims. *Aluminium Guide* [online]. aluminium-guide.com, c2013-2023 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://aluminium-guide.com/en/alyuminievye-kolesnye-diski-varit-ili-ne-varit/>
 32. HADZIHAFIZOVIC, Dzevad. *How to Avoid Cracking in Aluminum*. 2022 [cit. 2023-20-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/365184930_How_to_Avoid_Cracking_in_Aluminum
 33. GRONOSTAJSKI, Zbigniew, Sławomir POLAK, Karol JAŚKIEWICZ, Paweł KACZYŃSKIA, Matuesz SKWARSKI, Jakub KRAWCZYK, Władysław CHORZEPA, Krzysztof ŚLIZ a Sławomir UZAR. Properties of B-pillar made of aluminium 7075 in warm forming process. *Procedia Manufacturing* [online]. 2019, 27, 98-103 [cit. 2022-12-30]. ISSN 23519789. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.050>
 34. KOPELIOVICH, Dmitri. Engine Bearing Materials. In: *SubsTech* [online]. substech.com, 2021-10-07 [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=engine_bearing_materials
 35. *Joining automotive aluminum parts* [interní firemní dokument]. SKS Welding Systems, c2021
 36. LI, Yiwen, Wenfeng ZOU, Boyoung LEE, Aleksandr BABKIN a Yunlong CHANG. Research progress of aluminum alloy welding technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, 109(5-6), 1207-1218 [cit. 2022-06-11]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05606-1>
 37. VERMA, P. Rajesh, N. Kailash PANDEY, Kovács ANDRÁS, Rohit KHARGOTRA a Tej SINGH. Difficulties and redressal in joining of aluminium alloys by GMA and GTA welding: a review. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2023, 23, 2576-2586 [cit. 2023-02-07]. ISSN 22387854. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.183>
 38. AMBRIZ, R. Rafael a David JARAMILLO. Mechanical Behavior of Precipitation Hardened Aluminum Alloys Welds. In: MONTEIRO, Waldemar Alfredo, ed. *Light Metal Alloys Applications* [online]. InTech, 2014, 2014-06-11 [cit. 2023-02-07]. ISBN 978-953-51-1588-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/58418>
 39. MIRMAHDI, Esmail. Analysis and Examination of Aluminum Sheets Suitable for Automotion Body: Ultrasonic Testing, Signal Processing, Simulation. *Russian Journal of Nondestructive Testing* [online]. 2021, 57(2), 135-144 [cit. 2023-02-10]. ISSN 1061-8309. Dostupné z: <https://doi.org/10.1134/S1061830921020108>
-

-
40. Svařování TIG DC, TIG AC, pulse. *Svářečky-elektrody.cz* [online]. svářečky-elektrody.cz, c2023 [cit. 2023-02-07]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-ac-nebo-dc/t-68/t-122>
 41. Robotic TIG Welding. *JUCAT* [online]. Jucat Oy [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://jucat.fi/features/robotic-tig-welding/>
 42. ORSZÁGH, Peter a Viktor ORSZÁGH. *Zváranie MIG/MAG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, 2000, 460 s. : il. ISBN 80-88780-36-5.
 43. BITE, Rob. What's the Best Gas for MIG Welding Aluminum? In: *simcoegases* [online]. Simcoe Gases, 2021-10-12, 2022-06-01 [cit. 2023-02-07]. Dostupné z: <https://www.simcoegases.com/post/what-s-the-best-gas-for-mig-welding-aluminum>
 44. *Ceník technických plynů* [online]. SIAD Czech spol., 2020 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.siad.com/documents/30774/0/Cen%C3%ADk+technick%C3%BDch+plyn%C5%AF+SIAD+PM+2020.pdf>
 45. TANMOY, Das. Resistance Spot Welding: Principles and Its Applications. In: COOKE, O. Kavian a Ronaldo C. COZZA, ed. *Engineering Principles - Welding and Residual Stresses* [online]. IntechOpen, 2022, 2022-6-23 [cit. 2023-02-08]. ISBN 978-1-80355-384-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.103174>
 46. MANLADAN, M. Sunusi , Farazila YUSOF, Singh RAMESH, Jamaludin FADZIL, Zhen LUO a Sansan AO. A review on resistance spot welding of aluminum alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, 90(1-4), 605-634 [cit. 2023-03-18]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9225-9>
 47. HONG, Kyung-Min a Yung C. SHIN. Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, 245, 46-69 [cit. 2023-03-18]. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.008>
 48. HEIDARZADEH, Akbar, Sergey MIRONOV, Rustam KAIBYSHEV, Gürel CAM, Aude SIMAR, Adrian P. GERLICH, Farzad KHODABAKHSKI, Amir MOSTAFAEI, David P. FIELD, Joseph ROBSON, Alexis, DESCHAMPS a Philip J. WITHERS. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. *Progress in Materials Science* [online]. 2021, 117 [cit. 2023-02-08]. ISSN 00796425. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100752>
 49. CHEN, Lin, Gaoyang MI, Xiong ZHANG a Chunming WANG. Comparative investigation on single laser beam and dual laser beam for lap welding of aluminum alloy. *Journal of Laser Applications* [online]. 2020, 32(4) [cit. 2023-03-18]. ISSN 1042-346X. Dostupné z: <https://doi.org/10.2351/7.0000141>
 50. BUNAZIV, Ivan, Odd M. AKSELTEN, Xiaobo REN, Bård NYHUS a Magnus ERIKSSON. Laser Beam and Laser-Arc Hybrid Welding of Aluminium Alloys. *Metals* [online]. 2021, 11(8) [cit. 2023-03-19]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met11081150>
-

-
51. KORZHIK, Volodymyr N., Volodymyr N. SYDORETS, Shanguo HAN, Oleksandr A. BABYCH, Andriy A. GRINYUK a Vladyslav Yu. KHASKIN. Development of a robotic complex for hybrid plasma-arc welding of thin-walled structures. *The Paton Welding Journal* [online]. 2017, 2017(6), 62-70 [cit. 2023-03-19]. ISSN 0957798X. Dostupné z: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.12>
 52. GUO, Yangyang, Houhong PAN, Lingbao REN a Gaofeng QUAN. An investigation on plasma-MIG hybrid welding of 5083 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2018, 98(5-8), 1433-1440 [cit. 2023-03-19]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2206-4>
 53. ČSN EN ISO 10042. *Svařování – Svarové spoje hliníku a jeho slitin zhotovené obloukovým svařováním – Určování stupňů kvality*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019. Třídící znak 05 1111.
 54. MUSIL, Miloslav a Jaromír MORAVEC. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: výukové materiály pro kurzy Mezinárodní svářečský inženýr IWE, Mezinárodní svářečský technolog IWT*. Česká Třebová: DOM-ZO 13, 2017. ISBN 978-80-906720-0-0.
 55. ČSN EN ISO 17635. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Obecná pravidla pro kovové materiály*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. Třídící znak 05 1170.
 56. ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022. Třídící znak 05 1128.
 57. SIGMUND, Marian. *Elektrický oblouk, zdroje* [školní prezentace]. [cit. 2023-01-20]
 58. MATHINSON, Jerry. Understanding transfer modes for GMAW. In: *The Fabricator* [online]. FMA Communications, 2008-12-14 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/consumables/understanding-transfer-modes-for-gmaw>
 59. OCHODEK, Vladislav. *Vliv teplotního režimu svařování na vlastnosti svarových spojů – I* [online prezentace]. Ostrava: VŠB TU [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: https://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv_tep_l_rezimu_a1.pdf
 60. KOVALČÍK, Tomáš, aplikační inženýr SKS Welding Systems [ústní sdělení]. Napajedla, 2. 2. 2023
 61. *Návod k obsluze DCT – svářečcí proudový zdroj LSQ5* [návod k obsluze]. SKS Welding Systems.
 62. Svařovací systémy Valk jsou k dispozici také s automatickou výměnou svařovacích špiček. *Valk Welding* [online]. Valk Welding Group, c2023 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://valkwelding.com/cz/novinky/svarovaci-systemy- Valk-jsou-k-dispozici-take-s-automatickou-vymenou-svarovacich-spicek>
 63. Welding Machines. *SKS Welding Systems* [online]. SKS Welding Systems [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.sks-welding.com/en/welding-machines>
 64. HyperFill® Fab-Pak® Headstock. *Lincoln Electric* [online]. The Lincoln Electric Company, c2023 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en/Products/ad2457-1>
 65. Arc Mate 120iD. *FANUC* [online]. FANUC [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%c3%a1nka-filtru->
-

robot%5%af/sva%5%99ov%3%a1n%3%ad-elektrick%3%bdm-obloukem/arcmate-120id

66. *Basic training with Experience Centre* [pracovní manuál]. AWL-Techniek, 2019.
 67. *R-30iB Basic Operator's Manual* [návod k obsluze]. FANUC Corporation, c2012.
 68. Řídící jednotka R-30iB Plus. *FANUC* [online]. FANUC [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD/robot-controller-and-connectivity>
 69. Nový dotykový ovladač iPendant-Touch. *FANUC* [online]. FANUC [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD/robot-controller-and-connectivity/ipendant-touch>
 70. Weld Packages. *SKS Welding Systems* [online]. SKS Welding Systems [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.sks-welding.com/en/weld-packages>
 71. KOVALČÍK, Tomáš. *Pomoc SKS zdroje* [elektronická pošta]. Message to: saloja@email.cz. 20. března 2023 8:51 [cit. 2023-03-21]. Osobní komunikace
 72. *Návod k obsluze – Řídící jednotka svařování Q80* [návod k obsluze]. SKS Welding Systems.
 73. Sidergas M5356 – drát na hliník – 1,2 mm. *Svářečky-elektrody.cz* [online]. svářečky-elektrody.cz, c2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/sidergas-m5356-drat-na-hlinik-1-2-mm-7-kg/>
 74. *Work Instruction Testing of Weld samples* [pracovní manuál]. AWL-Techniek, 2022.
 75. Zandler S – AlMg5. *Wirpo* [online]. Wirpo [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.wirpo.cz/pridavne-materialy/produkty/104/>
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK
Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
A ₅₀	tažnost	[%]
a	šířka koutového svaru	[mm]
b ₁	šířka průvaru prvního plechu	[mm]
b ₂	šířka průvaru druhého plechu	[mm]
f ₁	hloubka průvaru prvního plechu	[mm]
f ₂	hloubka průvaru druhého plechu	[mm]
I	svařovací proud	[A]
p _{max}	velikost největšího póru	[mm]
Q _{sv}	teplo vnesené do svarového spoje	[kJ]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
S _n	nejkratší úsečka přeplátovaného spoje	[mm]
t ₁	tloušťka prvního plechu	[mm]
t ₂	tloušťka druhého plechu	[mm]
U	svařovací napětí	[V]
v	rychlost svařování	[mm·s ⁻¹]
v _D	rychlost posuvu drátové elektrody	[m·min ⁻¹]
η	účinnost	[-]

Zkratky

Označení	Legenda
FCC	face centered cubic – plošně středěná kubická mřížka
NOK	nevyhovující
OK	vyhovující
OO	osa otáčení
PM	přídavný materiál
SCC	stress corrosion cracking (koroze pod napětím)
TOO	tepelně ovlivněná oblast
TZ	tepelné zpracování
VA	voltampérová
ZM	základní materiál

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Materiálový list svařovací drát AlMg5 [75]
 - Příloha 2 Přeplátovaný spoj plechů 3 mm a 5 mm.
 - Příloha 3 Přeplátovaný spoj plechů 5 mm a 5 mm.
 - Příloha 4 Koutový spoj plechů 3 mm a 5 mm.
 - Příloha 5 Koutový spoj plechů 5 mm a 5 mm.
 - Příloha 6 Metalografické výbrusy řezů spojů P3-1 a P3-2
 - Příloha 7 Metalografické výbrusy řezů spojů P4-1 a P4-2
 - Příloha 8 Metalografické výbrusy řezů spojů P5-1 a P5-2
 - Příloha 9 Svařovací parametry spojů P6-1 a P6-2
 - Příloha 10 Metalografické výbrusy a ověření kvality spojů P6-1 a P6-2 v řezech
-



Zander S - AlMg5

Strana 1/1

SKUPINA:	Hliník a jeho slitiny
METODA:	Plné dráty pro metodu MAG/MIG (131, 135)
TYP:	Plný drát / MIG
NORMY:	EN ISO 18273 : S Al 5356 (AlMg5Cr(A)) AWS A 5.10 : ER 5356
W.NR.:	3.3556
VÝROBCE:	Zander Schweissttechnik
MATERIÁLY:	AlMg 1, AlMg 1,8, AlMg 5, AlMgSi0,5, AlMgSi 0,8, G-AlMg3Si, 3.3315, 3.3326, 3.3555, 3.3210, 3.2316, 3.3241 5005A, 5051A, 5056A, 6060, 6181, 5120
POUŽITÍ:	Plný drát pro svařování odlitků hliníku a slitin hliníku legovaného do 5% Mg, oblast svařování musí být kovově čistá. Pro plechy silnější 15 mm předehřev cca 150 °C. Základní materiál např.: AlMg3, AlMg2Mn0,8, AlMg2,7Mn. Odolný proti povětrnostním vlivům a mořské vodě.

CHEMICKÉ SLOŽENÍ

Mn	Si	Cr	Cu	Ti	Al	Mg	Zn	Fe
0,15	0,2	0,2	0,05	0,1	rest	5	0,1	0,2

MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Stav	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
AW : po svaření	115	255	25

Teplota tání °C : 580 - 642

POLARITA: DC+

PLYN: I1, I3

POLOHY:

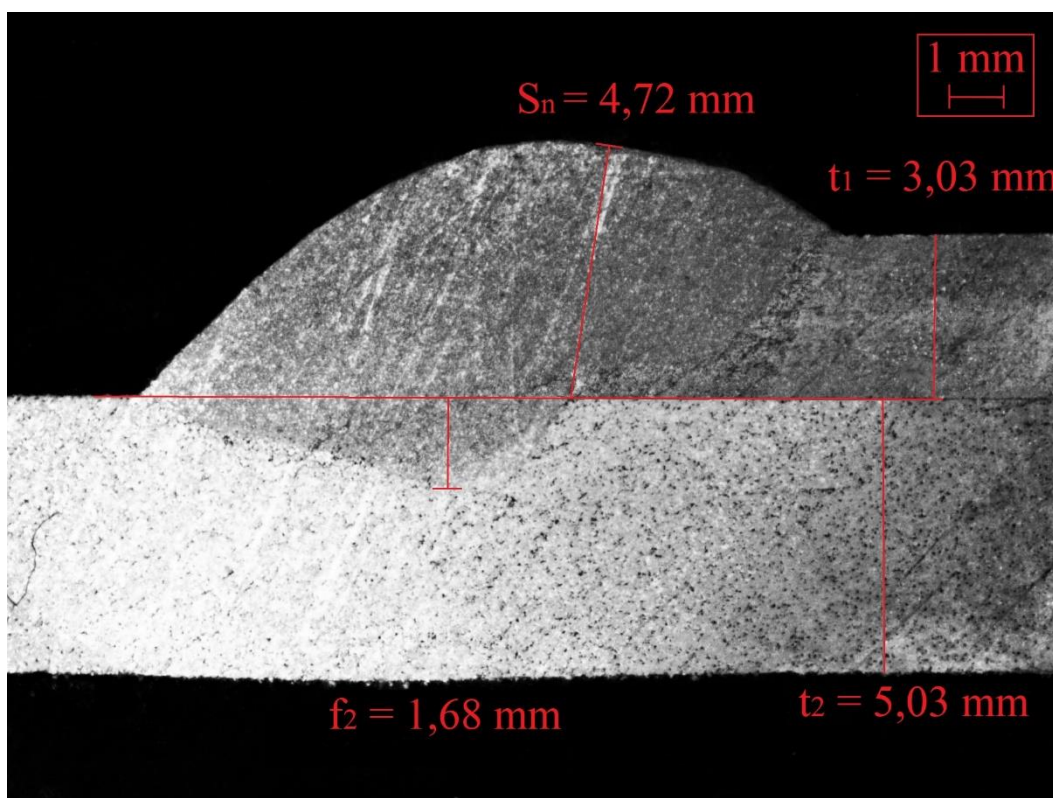


PRŮMĚRY A BALENÍ

Objednáč číslo	Průměr	Balení
AL5356S10Z	1,0 mm	7 kg / BS300
AL5356S12Z	1,2 mm	7 kg / BS300
AL5356S16Z	1,6 mm	7 kg / BS300



Vizuální podoba spoje P351.



Metalografický výbrus spoje P351.

Tab. TP351 Manuálně nastavované parametry svařování spoje P351.

parametr	hodnota
rychlost svařování	$9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ počátečních 20 mm; $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ zbytek délky
výlet drátu	15 mm
úhel sklonu hořáku	35°
úhel tlačení hořáku	15°

Tab. TP352 Srovnání kvality spoje P351 s požadovanými podmínkami.

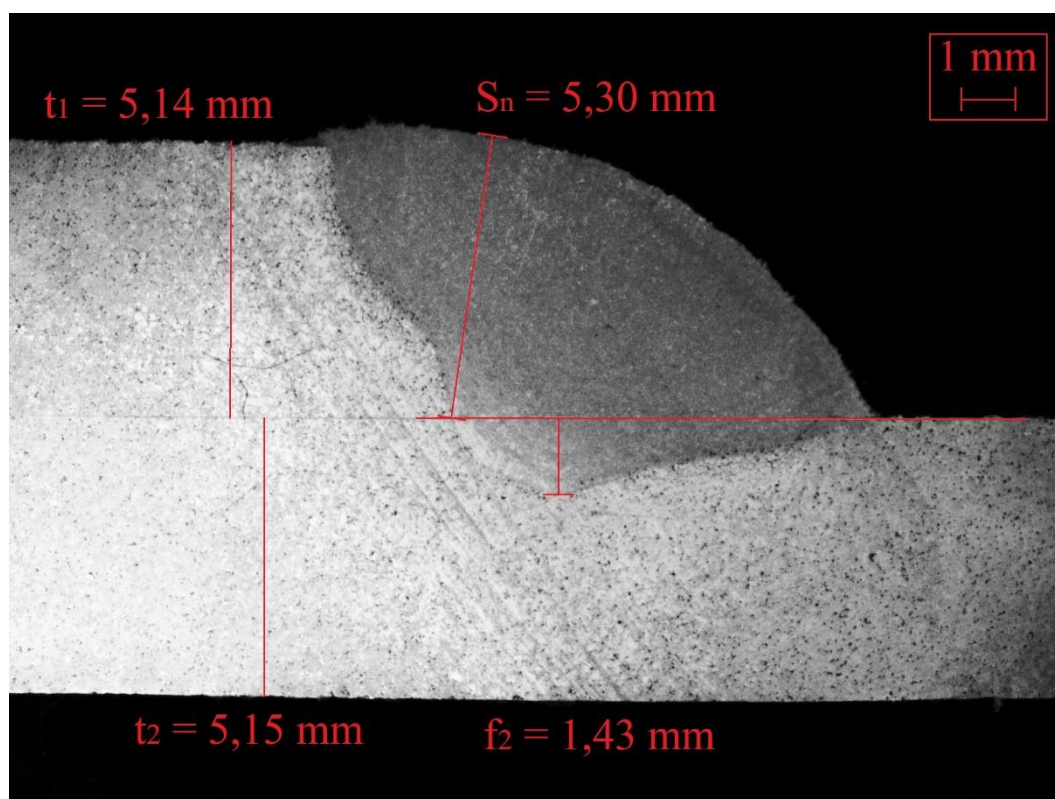
název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
hloubka průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 5,03 \geq 1,00$	$f_2 = 1,68$ mm	OK
nejkratší úsečka [mm]	$s_n \geq t_{\min} \geq 3,03$	$s_n = 4,72$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot s_n \leq 0,2 \cdot 4,72 \leq 0,94$	$p_{\max} = 0,00$ mm	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK

I-DP		Start		P2	P3	OFF	END	Unit
99.999Ar G 00 T 09		Wire feed 1	12.0	10.0	12.0			6.0 m/min
Process I-Puls		SynchroWeld OFF						
User Expert		Window width 0.0 ±%						
Operation mode Timer		Voltage	25.2	24.0	25.0			19.4 V
AL 1-L		Correction	3.0	2.8	2.8			0.6 V
Diameter 1.2 mm		Pulse time	2.1	2.0	2.1			1.7 ms
99.999Ar		Pulse current	290	290	290			270 A
Gas pre flow 0.70 s		Base current	80	60	70			30 A
Gas past flow 1.00 s		Welding current	140	128	140			98 A
Gas quantity 16.0 l/min		Char. (Auto)	3.56	3.92	3.56			5.12 V/100A
Miscellaneous		Release	ON	ON	ON			ON
Mode Single wire		Program duration	0.8	0.04	0.04			1.00 s
Motor 1/2 Motor 1		Next program	Extern	P3	P2			Extern
Lift Arc ON		Analog output	4.0	8.0	12.0			28.0 %
Polwender OFF		Test AutoComp		ON	ON			ON
Program Slope OFF		On AutoComp limit		STOP	STOP			STOP
Start-Slope ON		AutoComp limit		3.0	3.0			3.0 V
DP Fast ON		AutoComp filter						1.00 s
Master mode Master		On lost arc	STOP	STOP	STOP			STOP
Arc release after ignition		Arc filter	0.50	0.50	0.50			0.50 s
Gas flow Don't test		Motor monitoring		ON	ON			ON
Water pump OFF		Motor limit		3.0	3.0			3.0 A
Measure interval 0.10 s		Motor filter						2.00 s
Alarm time 2.00 s								

Nastavení svařovacích parametrů kontroloru Q80 pro spoj P351.



Vizuální podoba spoje P551.



Metalografický výbrus spoje P551.

Tab. TP551 Manuálně nastavované parametry svařování spoje P551.

parametr	hodnota
rychlost svařování	$9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ počátečních 20 mm; $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ zbytek délky
výlet drátu	15 mm
úhel sklonu hořáku	35°
úhel tlačení hořáku	15°

Tab. TP552 Srovnání kvality spoje P551 s požadovanými podmínkami.

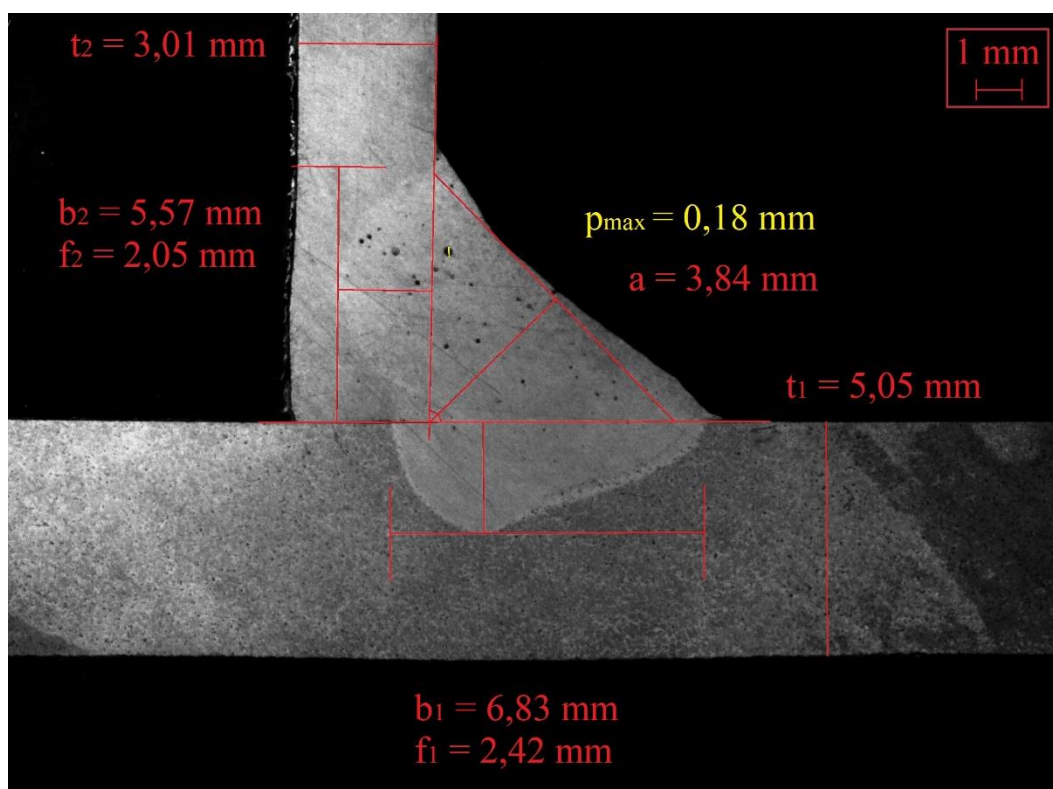
název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
hloubka průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 5,15 \geq 1,03$	$f_2 = 1,43$ mm	OK
nejkratší úsečka [mm]	$s_n \geq t_{\min} \geq 5,14$	$s_n = 5,30$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot s_n \leq 0,2 \cdot 5,30 \leq 1,06$	$p_{\max} = 0,00$ mm	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK

I-DP overlap		Start P2 P3 OFF END Unit							
99.999Ar G 00 T 09		Wire feed 1	12.0	10.0	12.0			5.0	m/min
Process I-Puls		SynchroWeld OFF							
User Expert	Start parameter	Window width	0.0						±%
Operation mode Timer	Ignition filter 2.00 s	Voltage	25.2	24.0	25.0			18.6	V
AL 1-L	Start-Seq. 6.0 ms	Correction	3.0	2.8	2.8			0.6	V
Diameter 1.2 mm	I-Ignition 20 A	Pulse time	2.1	2.0	2.1			1.7	ms
	Wire in speed 1.0 m/min	Pulse current	290	290	290			270	A
		Base current	80	80	80			30	A
99.999Ar	Program parameter	Welding current	140	128	140			90	A
Gas pre flow 0.70 s	UpSlope 60.0 %	Char. (Auto)	3.56	3.92	3.56			5.56	V/100A
Gas past flow 1.00 s	DownSlope 6.0 %	Release	ON	ON	ON			ON	
Gas quantity 12.0 l/min		Program duration	0.8	0.04	0.04			0.20	s
Miscellaneous	EndParameter	Next program	Extern	P3	P2			Extern	
Mode Single wire	Burn back 2.0 mm	Analog output	4.0	8.0	12.0			28.0	%
Motor 1/2 Motor 1	End crater (P7) 1	Test AutoComp		ON	ON			ON	
Lift Arc ON	Analog output 32.0 %	On AutoComp limit		STOP	STOP			STOP	
Polwender OFF		AutoComp limit		3.0	3.0			3.0	V
Program Slope OFF		AutoComp filter		1.00					s
Start-Slope ON		On lost arc	STOP	STOP	STOP			STOP	
DP Fast ON		Arc filter	0.50	0.50	0.50			0.50	s
Master mode Master		Motor monitoring		ON	ON			ON	
Arc release after ignition		Motor limit		3.0	3.0			3.0	A
Gas flow Don't test		Motor filter		2.00					s
Water pump OFF									
Measure interval 0.10 s									
Alarm time 2.00 s									

Nastavení svařovacích parametrů kontroloru Q80 pro spoj P551.



Vizuální podoba spoje K351.



Metalografický výbrus spoje K351.

Tab. TK351 Manuálně nastavované parametry svařování spoje K351.

parametr	hodnota
rychlost svařování	$12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ počátečních 20 mm; $13 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ zbytek délky
výlet drátu	14 mm
úhel sklonu hořáku	25°
úhel tlačení hořáku	15°

Tab. TK352 Srovnání kvality spoje K351 s požadovanými podmínkami.

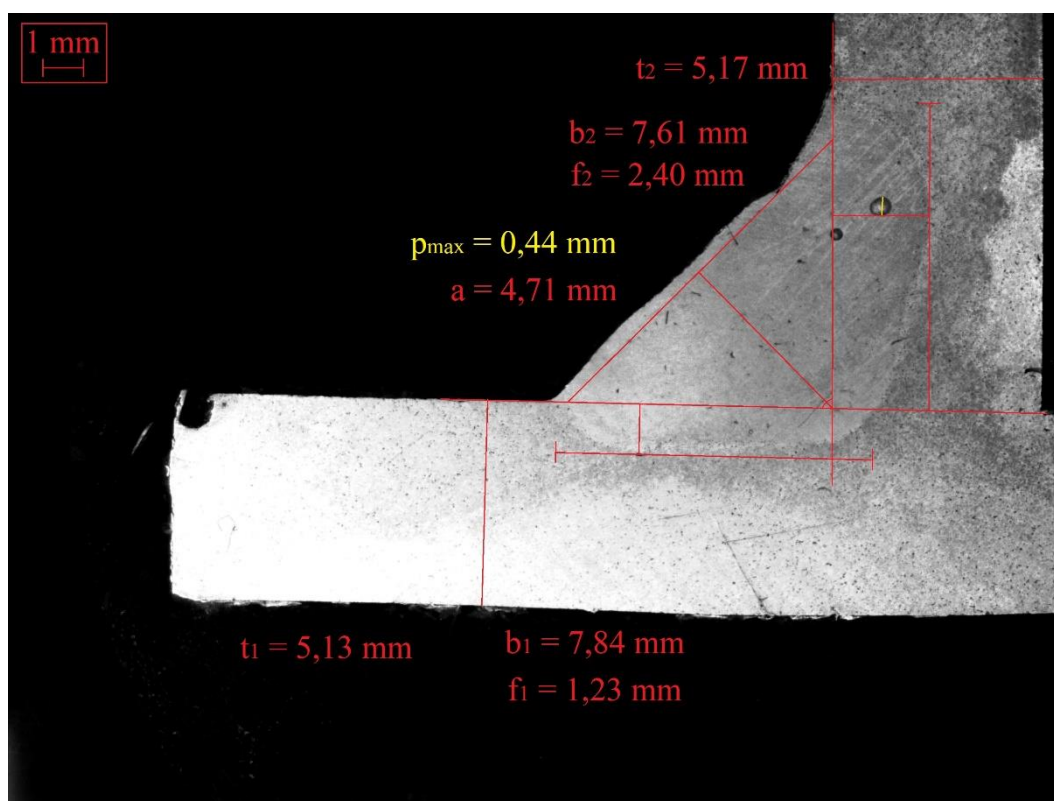
název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{\min} \geq 3,01$	$b_1 = 6,83$ mm	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{\min} \geq 3,01$	$b_2 = 5,57$ mm	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 5,05 \geq 1,01$	$f_1 = 2,42$ mm	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 3,01 \geq 0,60$	$f_2 = 2,05$ mm	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min} \geq 0,7 \cdot 3,01 \geq 2,11$	$a = 3,84$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 3,84 \leq 0,77$	$p_{\max} = 0,18$ mm	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK

KF-DP fillet		Start P2 P3 OFF END Unit							
KF-Puls Timer		Wire feed 1	10.0	11.0	13.0			6.0	m/min
99.999Ar G 01 T 23		Slope		0.00	0.00			0.50	s
Process KF-Puls		SynchroWeld OFF							
User Expert	Start parameter	Window width	0.0						±%
Operation mode Timer	Ignition filter 2.00 s								
AL 1-I	Start-Seq. 8.8 ms								
Diameter 1.2 mm	Ignition 764 A	Pulse voltage	30.0	30.0	30.0			30.0	V
	Wire in speed 1.7 m/min	Field charact.	54.0	54.0	54.0			47.6	%
99.999Ar	Program parameter	Base current	80	60	60			26	A
Gas pre flow 0.50 s									
Gas past flow 1.00 s	KF Dynamics 0	Pulse time	2.0	1.9	2.1			2.4	ms
Gas quantity 16.0 l/min	DownSlope 1.6 %	Base current time	3.2	6.8	5.8			19.4	ms
Miscellaneous	EndParameter								
Mode Single wire	Burn back 0.8 mm	Pulse frequency	192.3	114.9	126.6			45.9	Hz
Motor 1/2 Motor 1	End crater (P7) 1	Release	ON	ON	ON			ON	
Lift Arc ON	Analog output 32.0 %	Program duration	0.6	0.10	0.10			1.00	s
Polwender OFF		Next program	Extern	P3	P2			Extern	
Program Slope ON		Analog output	4.0	8.0	12.0			28.0	%
Start-Slope ON									
DP Fast ON		On lost arc	STOP	STOP	STOP			STOP	
Master mode Master		Arc filter	0.50	0.50	0.50			0.50	s
Arc release after ignition		Motor monitoring		ON	ON			ON	
Gas flow Don't test		Motor limit		3.0	3.0			3.0	A
Water pump OFF		Motor filter	2.00						s
Measure interval 0.04 s									
Alarm time 2.00 s									

Nastavení svařovacích parametrů kontroloru Q80 pro spoj K351.



Vizuální podoba spoje K551.



Metalografický výbrus spoje K551.

Tab. TK551 Manuálně nastavované parametry svařování spoje K551.

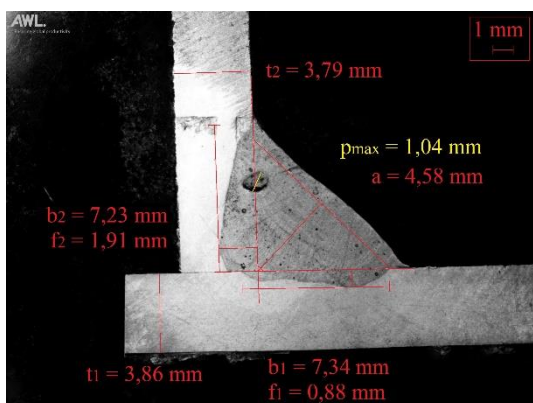
parametr	hodnota
rychlost svařování	$9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ počátečních 20 mm; $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ zbytek délky
výlet drátu	12 mm
úhel sklonu hořáku	45°
úhel tlačení hořáku	15°

Tab. TK552 Srovnání kvality spoje K551 s požadovanými podmínkami.

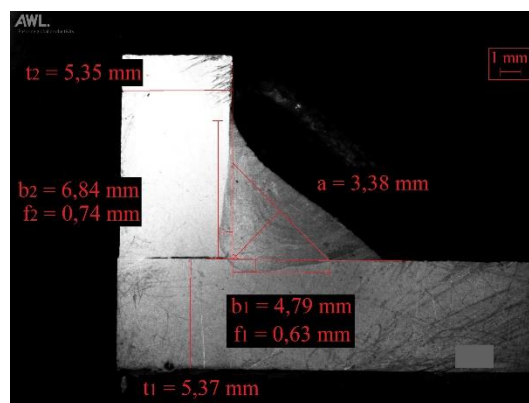
název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{\min} \geq 5,13$	$b_1 = 7,84$ mm	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{\min} \geq 5,13$	$b_2 = 7,61$ mm	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 5,13 \geq 1,03$	$f_1 = 1,23$ mm	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 5,17 \geq 1,03$	$f_2 = 2,40$ mm	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min} \geq 0,7 \cdot 5,13 \geq 3,59$	$a = 4,71$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 4,71 \leq 0,94$	$p_{\max} = 0,44$ mm	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK

KF-DP fillet		Start	P2	P3	OFF	END	Unit
KF-Puls Timer		Wire feed 1	10.0	11.0	13.0		6.0 m/min
99.999Ar		Slope		0.00	0.00		0.50 s
Process KF-Puls		SynchroWeld OFF					
User Expert	Start parameter	Window width	0.0				±%
Operation mode Timer	Ignition filter 2.00 s						
AL 1-L	Start-Seq. 8.8 ms						
Diameter 1.2 mm	I-Ignition 764 A	Pulse voltage	30.0	30.0	30.0		30.0 V
99.999Ar	Wire in speed 1.7 m/min	Field charact.	54.0	54.0	54.0		47.6 %
Gas pre flow 0.50 s	Program parameter	Base current	100	80	80		26 A
Gas past flow 1.00 s		Pulse time	2.0	1.9	2.1		2.4 ms
Gas quantity 16.0 l/min	KF Dynamics 0	Base current time	3.2	6.8	5.8		19.4 ms
Miscellaneous	DownSlope 1.6 %	Pulse frequency	192.3	114.9	126.6		45.9 Hz
Mode Single wire	EndParameter	Release	ON	ON	ON		ON
Motor 1/2 Motor 1	Burn back 0.8 mm	Program duration	0.6	0.10	0.10		1.00 s
Lift Arc ON	End crater (P7) 1	Next program	Extern	P3	P2		Extern
Polwender OFF	Analog output 32.0 %	Analog output	4.0	8.0	12.0		28.0 %
Program Slope ON							
Start-Slope ON		On lost arc	STOP	STOP	STOP		STOP
DP Fast ON		Arc filter	0.50	0.50	0.50		0.50 s
Master mode Master		Motor monitoring		ON	ON		ON
Arc release after ignition		Motor limit		3.0	3.0		3.0 A
Gas flow Don't test		Motor filter	2.00				s
Water pump OFF							
Measure interval 0.04 s							
Alarm time 2.00 s							

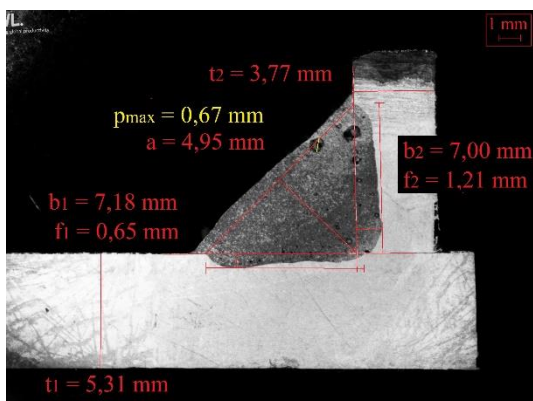
Nastavení svařovacích parametrů kontroloru Q80 pro spoj K551.



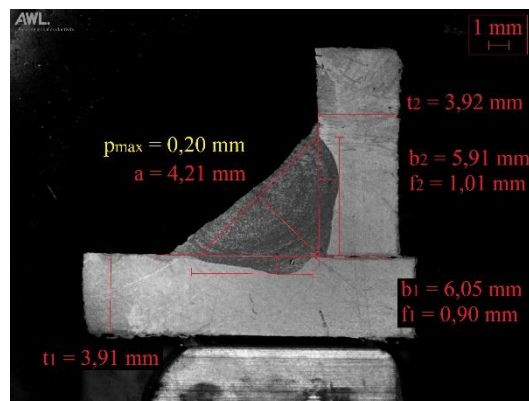
Výbrus spoje P3-1 v řezu 1B.



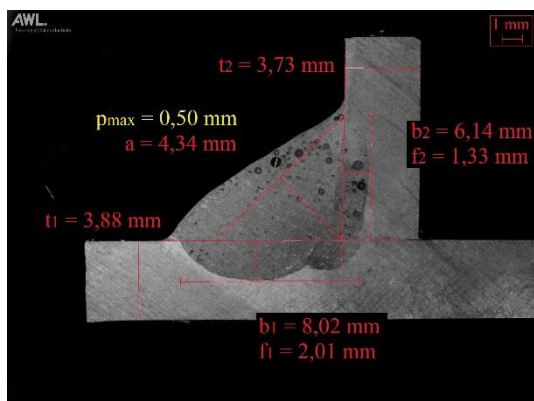
Výbrus spoje P3-2 v řezu 2B.



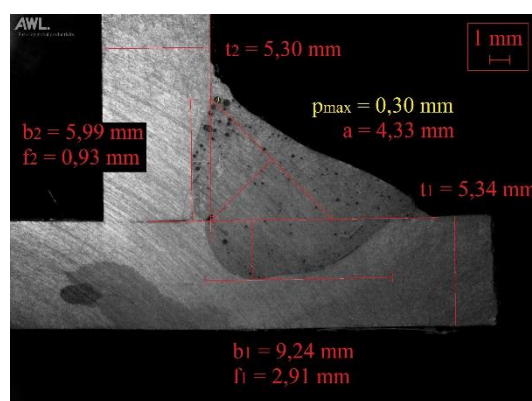
Výbrus spoje P3-1 v řezu 1C.



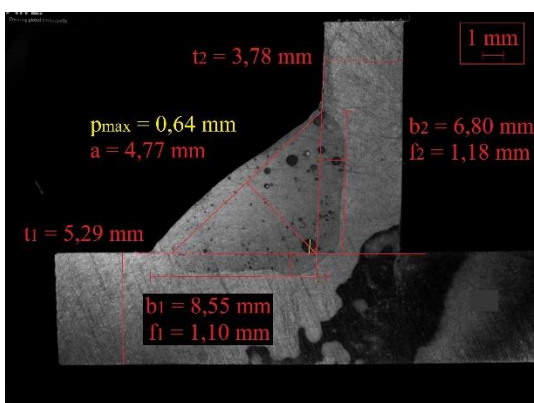
Výbrus spoje P3-2 v řezu 2C.



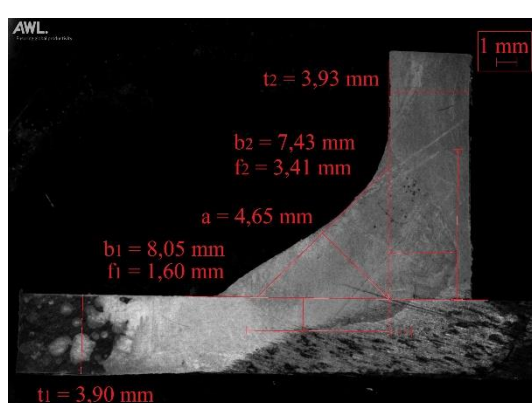
Výbrus spoje P4-1 v řezu 1B.



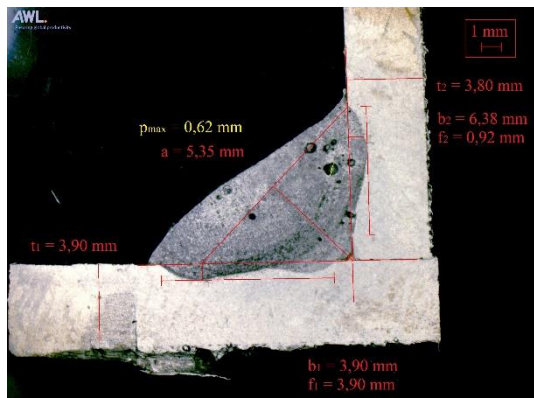
Výbrus spoje P4-2 v řezu 2B.



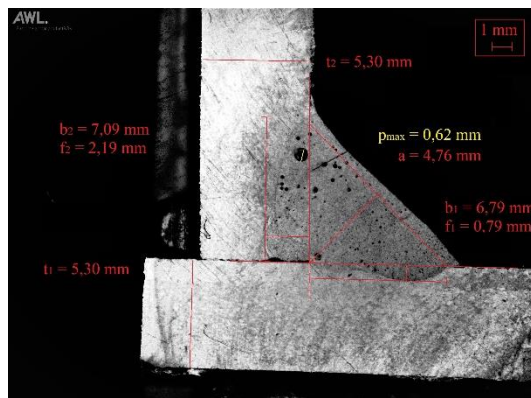
Výbrus spoje P4-1 v řezu 1C.



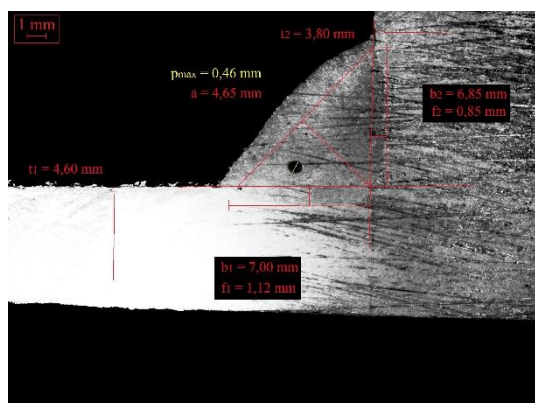
Výbrus spoje P4-2 v řezu 2C.



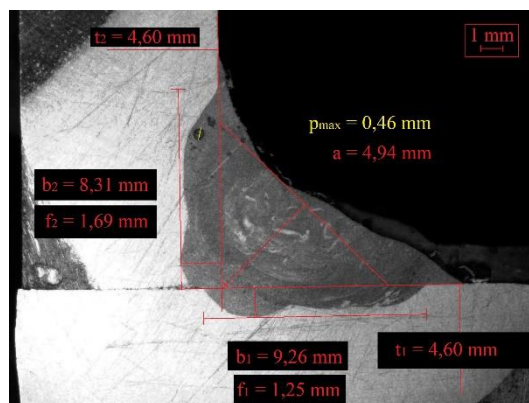
Výbrus spoje P5-1 v řezu 1E.



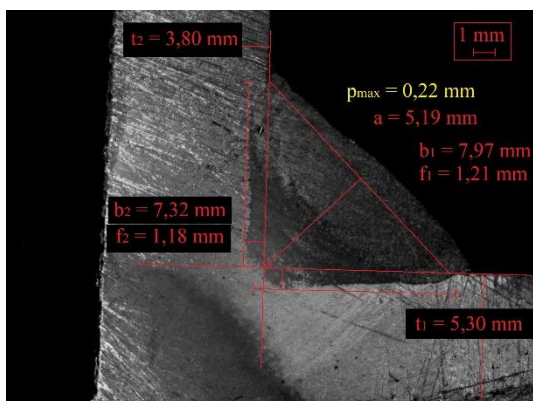
Výbrus spoje P5-2 v řezu 2E.



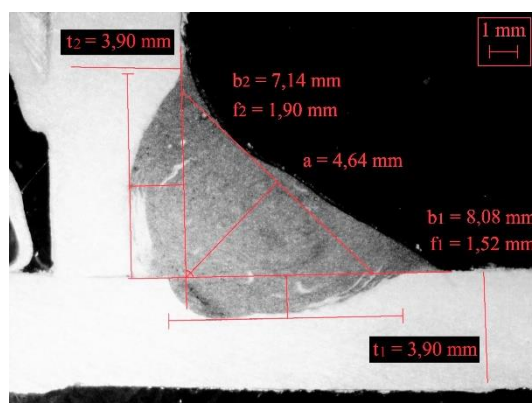
Výbrus spoje P5-1 v řezu 1F.



Výbrus spoje P5-2 v řezu 2F.



Výbrus spoje P5-1 v řezu 1G.



Výbrus spoje P5-2 v řezu 2G.

KF-DP fillet 1	
KF-Puls Timer	
AL 1-L 1.2 mm	
99.999Ar G 01 T 24	

Process	KF-Puls
User	Expert
Operation mode	Timer

AL 1-L	
Diameter	1.2 mm

99.999Ar		
Gas pre flow	0.50 s	
Gas past flow	1.00 s	
Gas quantity	16.0 l/min	

Miscellaneous	
Mode	Single wire
Motor 1/2	Motor 1
Lift Arc	OFF
Polwender	OFF
Program Slope	OFF
Start-Slope	OFF
DP Fast	ON
Master mode	Master
Arc release	after ignition
Gas flow	Don't test
Water pump	OFF
Measure interval	0.04 s
Alarm time	2.00 s

Start parameter	
Ignition filter	2.00 s
T-Ign.pulse	8.8 ms
I-Ignition	488 A
Wire in speed	1.7 m/min

Program parameter		
KF Dynamics	0	
DownSlope	1.6 %	

EndParameter		
Burn back	0.8 mm	
End crater (P7)	0	
Analog output	32.0 %	

	Start	P2	P3	OFF		Unit
Wire feed 1	11.0	11.0	13.0			m/min
SynchroWeld OFF						
Window width	0.0					±%
Pulse voltage	30.0	30.0	30.0			V
Field charact.	54.0	54.0	54.0			%
Base current	100	90	100			A
Pulse time	2.0	1.9	2.0			ms
Base current time	4.0	8.0	7.0			ms
Pulse frequency	166.7	101.0	111.1			Hz
Release	ON	ON	ON			
Program duration	0.6	0.10	0.10			s
Next program	Extern	P3	P2			
Analog output	4.0	8.0	12.0			%
On lost arc	STOP	STOP	STOP			
Arc filter	0.50	0.50	0.50			s
Motor monitoring		ON	ON			
Motor limit		3.0	3.0			A
Motor filter	2.00					s

Nastavení svařovacích parametrů kontroloru Q80 pro spoj P6-1.

KF-DP fillet 2	
KF-Puls Timer	
AL 1-L 1.2 mm	
99.999Ar G 01 T 25	

Process	KF-Puls
User	Expert
Operation mode	Timer

AL 1-L	
Diameter	1.2 mm

99.999Ar		
Gas pre flow	0.50 s	
Gas past flow	1.00 s	
Gas quantity	16.0 l/min	

Miscellaneous	
Mode	Single wire
Motor 1/2	Motor 1
Lift Arc	OFF
Polwender	OFF
Program Slope	OFF
Start-Slope	OFF
DP Fast	ON
Master mode	Master
Arc release	after ignition
Gas flow	Don't test
Water pump	OFF
Measure interval	0.04 s
Alarm time	2.00 s

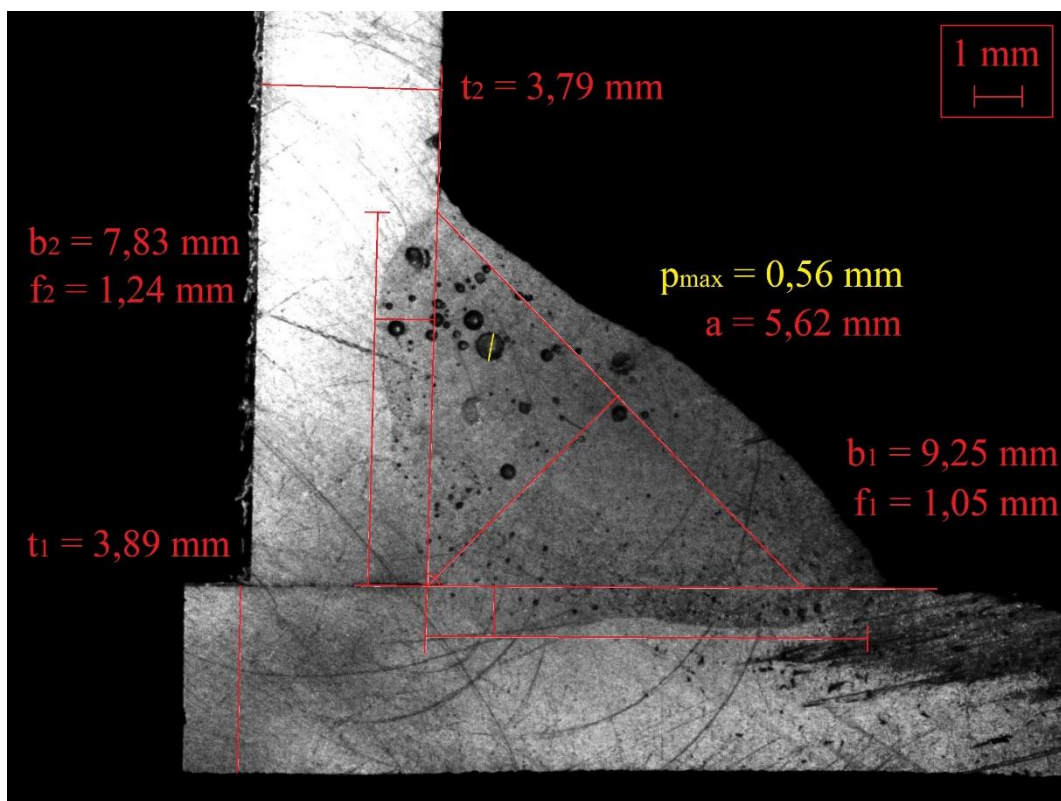
Start parameter	
Ignition filter	2.00 s
T-Ign.pulse	8.8 ms
I-Ignition	488 A
Wire in speed	1.7 m/min

Program parameter		
KF Dynamics	0	
DownSlope	1.6 %	

EndParameter		
Burn back	0.8 mm	
End crater (P7)	0	
Analog output	32.0 %	

	Start	P2	P3	OFF		Unit
Wire feed 1	11.0	10.0	12.0			m/min
SynchroWeld OFF						
Window width	0.0					±%
Pulse voltage	30.0	30.0	30.0			V
Field charact.	54.0	54.0	54.0			%
Base current	100	80	90			A
Pulse time	2.0	2.2	2.3			ms
Base current time	4.0	8.0	7.0			ms
Pulse frequency	166.7	98.0	107.5			Hz
Release	ON	ON	ON			
Program duration	0.6	0.10	0.10			s
Next program	Extern	P3	P2			
Analog output	4.0	8.0	12.0			%
On lost arc	STOP	STOP	STOP			
Arc filter	0.50	0.50	0.50			s
Motor monitoring		ON	ON			
Motor limit		3.0	3.0			A
Motor filter	2.00					s

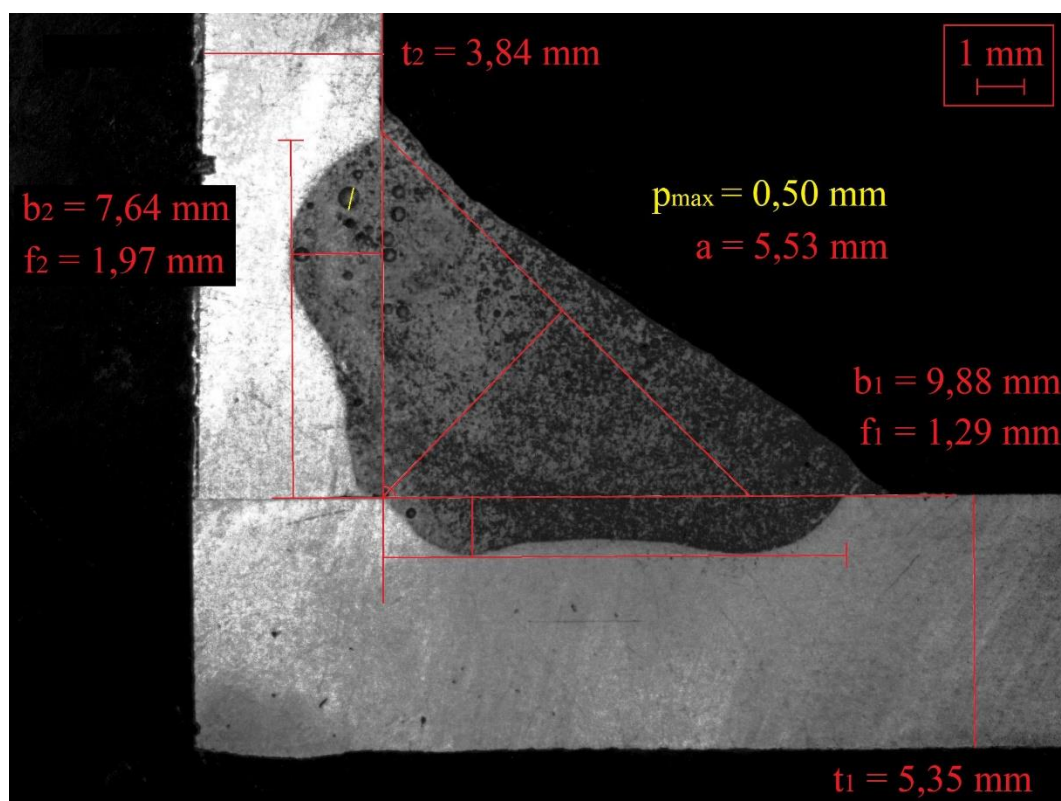
Nastavení svařovacích parametrů kontroloru Q80 pro spoj P6-2.



Metalografický výbrus spoje P6-1 v řezu 1B.

Tab. TP6-1B Srovnání kvality spoje P6-1 v řezu 1B s požadovanými podmínkami.

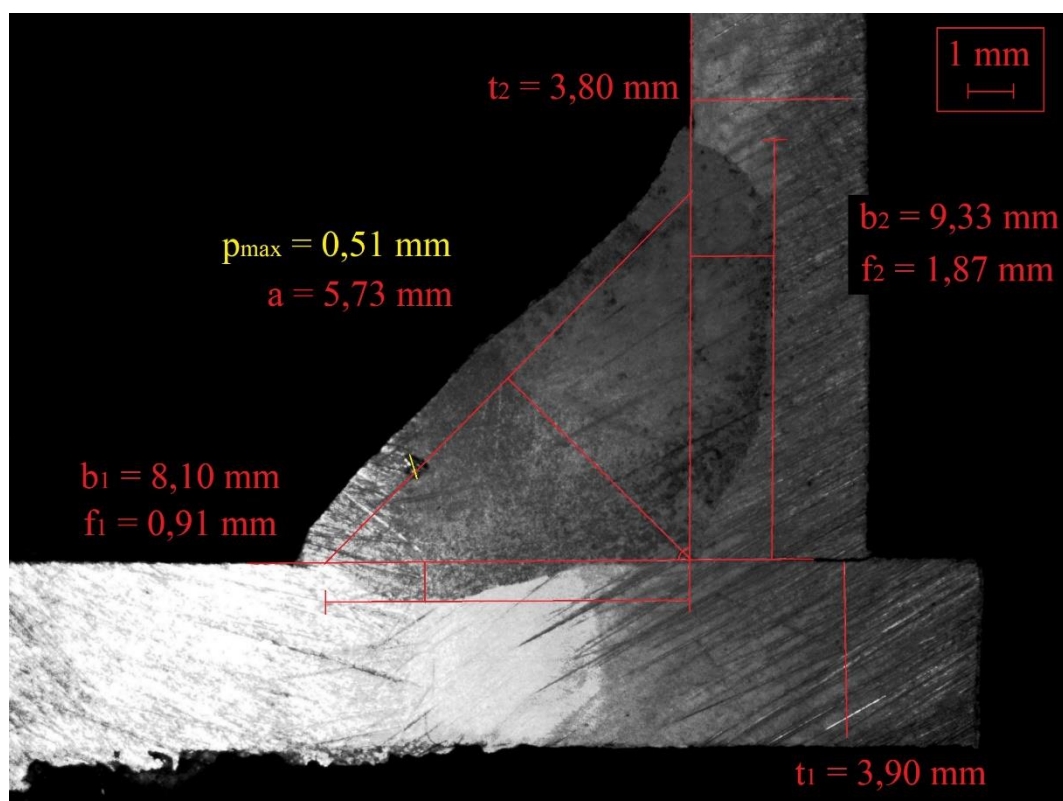
název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{\min} \geq 3,79$	$b_1 = 9,25$ mm	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{\min} \geq 3,79$	$b_2 = 7,83$ mm	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 3,89 \geq 0,78$	$f_1 = 1,05$ mm	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 3,79 \geq 0,76$	$f_2 = 1,24$ mm	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min} \geq 0,7 \cdot 3,79 \geq 2,65$	$a = 5,62$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 5,62 \leq 1,12$	$p_{\max} = 0,56$ mm	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK



Metalografický výbrus spoje P6-1 v řezu 1C.

Tab. TP6-1C Srovnání kvality spoje P6-1 v řezu 1C s požadovanými podmínkami.

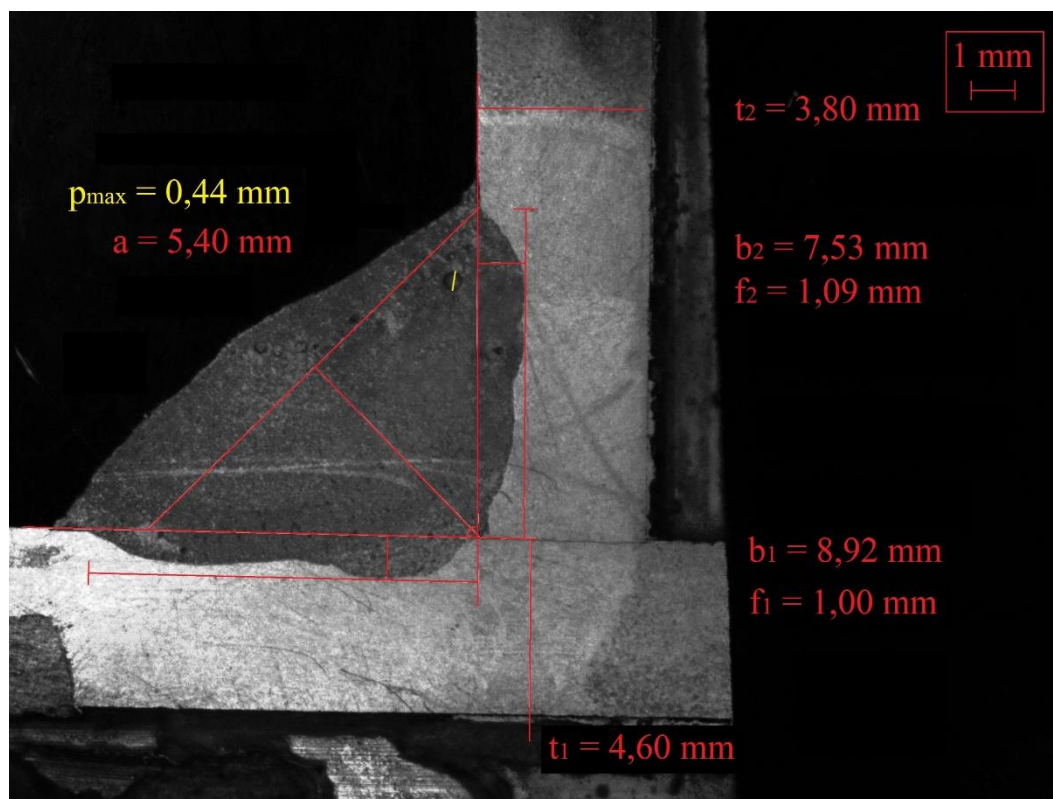
název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{\min} \geq 3,84$	$b_1 = 9,88 \text{ mm}$	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{\min} \geq 3,84$	$b_2 = 7,64 \text{ mm}$	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 5,35 \geq 1,07$	$f_1 = 1,29 \text{ mm}$	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 3,84 \geq 0,77$	$f_2 = 1,97 \text{ mm}$	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min} \geq 0,7 \cdot 3,84 \geq 2,69$	$a = 5,53 \text{ mm}$	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 5,53 \leq 1,11$	$p_{\max} = 0,50 \text{ mm}$	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK



Metalografický výbrus spoje P6-1 v řezu 1E.

Tab. TP6-1E Srovnání kvality spoje P6-1 v řezu 1E s požadovanými podmínkami.

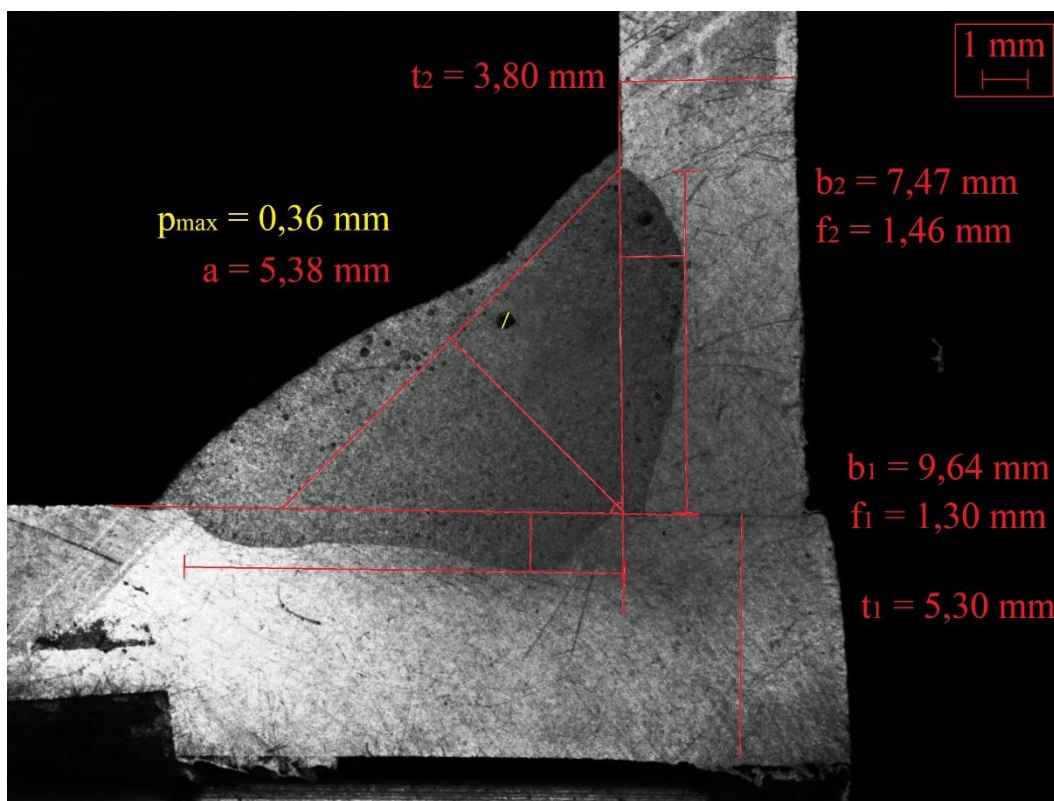
název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{\min} \geq 3,80$	$b_1 = 8,10$ mm	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{\min} \geq 3,80$	$b_2 = 9,33$ mm	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 3,90 \geq 0,78$	$f_1 = 0,91$ mm	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 3,80 \geq 0,76$	$f_2 = 1,87$ mm	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min} \geq 0,7 \cdot 3,80 \geq 2,66$	$a = 5,73$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 5,73 \leq 1,15$	$p_{\max} = 0,51$ mm	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK



Metalografický výbrus spoje P6-1 v řezu 1F.

Tab. TP6-1F Srovnání kvality spoje P6-1 v řezu 1F s požadovanými podmínkami.

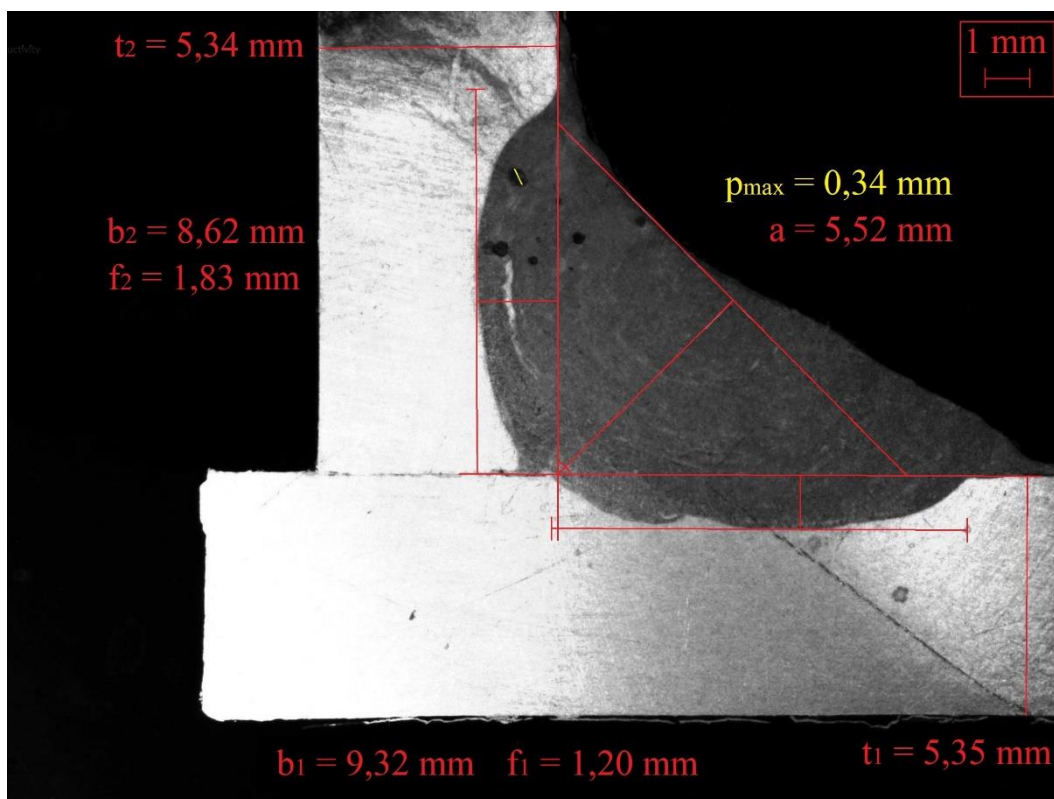
název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{\min} \geq 3,80$	$b_1 = 8,92$ mm	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{\min} \geq 3,80$	$b_2 = 7,53$ mm	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 3,80 \geq 0,76$	$f_1 = 1,00$ mm	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 4,60 \geq 0,92$	$f_2 = 1,09$ mm	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min} \geq 0,7 \cdot 3,80 \geq 2,66$	$a = 5,40$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 5,40 \leq 1,08$	$p_{\max} = 0,44$ mm	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK



Metalografický výbrus spoje P6-1 v řezu 1G.

Tab. TP6-1G Srovnání kvality spoje P6-1 v řezu 1G s požadovanými podmínkami.

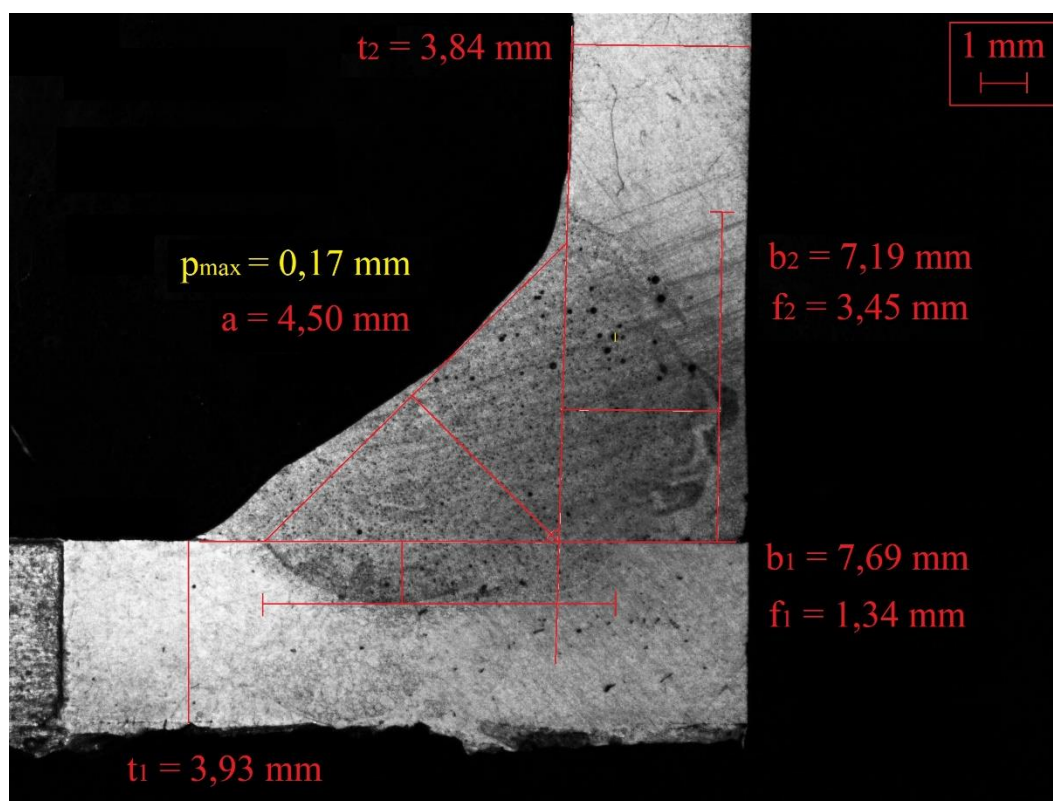
název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{\min} \geq 3,80$	$b_1 = 9,64$ mm	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{\min} \geq 3,80$	$b_2 = 7,47$ mm	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 5,30 \geq 1,06$	$f_1 = 1,30$ mm	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 3,80 \geq 0,76$	$f_2 = 1,46$ mm	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min} \geq 0,7 \cdot 3,80 \geq 2,66$	$a = 5,38$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 5,38 \leq 1,08$	$p_{\max} = 0,36$ mm	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK



Metalografický výbrus spoje P6-2 v řezu 2B.

Tab. TP6-2B Srovnání kvality spoje P6-2 v řezu 2B s požadovanými podmínkami.

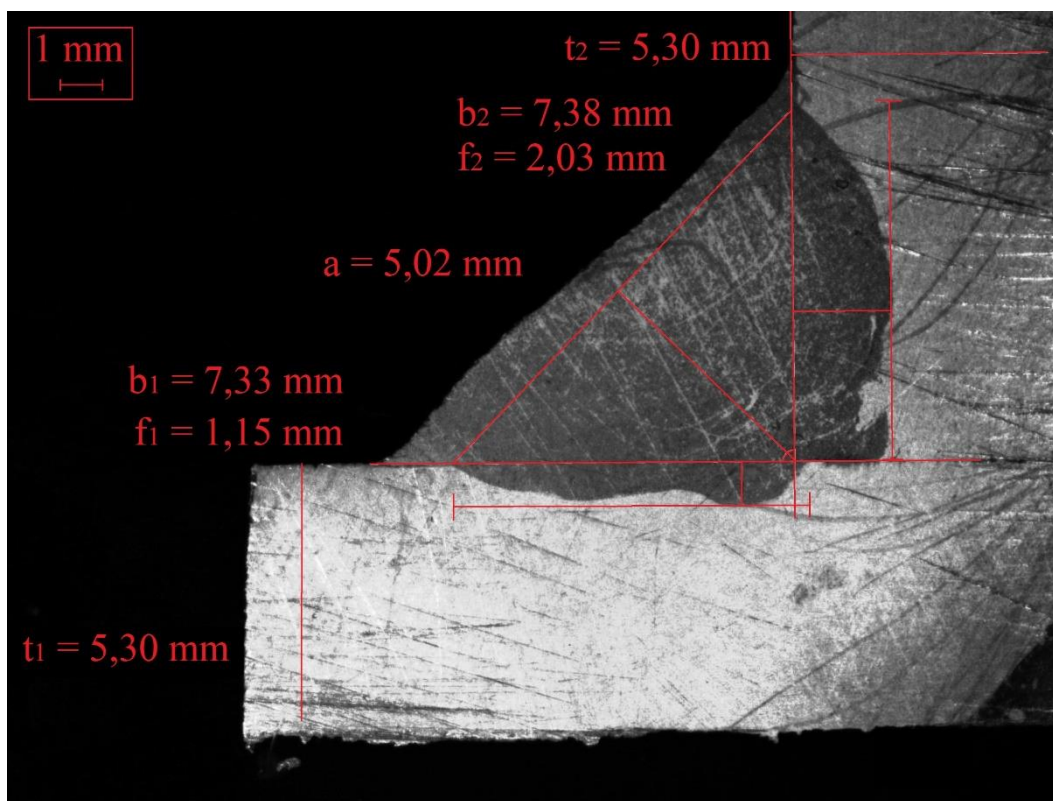
název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{\min} \geq 5,34$	$b_1 = 9,32 \text{ mm}$	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{\min} \geq 5,34$	$b_2 = 8,62 \text{ mm}$	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 5,35 \geq 1,07$	$f_1 = 1,20 \text{ mm}$	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 5,34 \geq 1,07$	$f_2 = 1,83 \text{ mm}$	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min} \geq 0,7 \cdot 5,34 \geq 3,74$	$a = 5,52 \text{ mm}$	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 5,52 \leq 1,10$	$p_{\max} = 0,34 \text{ mm}$	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK



Metalografický výbrus spoje P6-2 v řezu 2C.

Tab. TP6-2C Srovnání kvality spoje P6-2 v řezu 2C s požadovanými podmínkami.

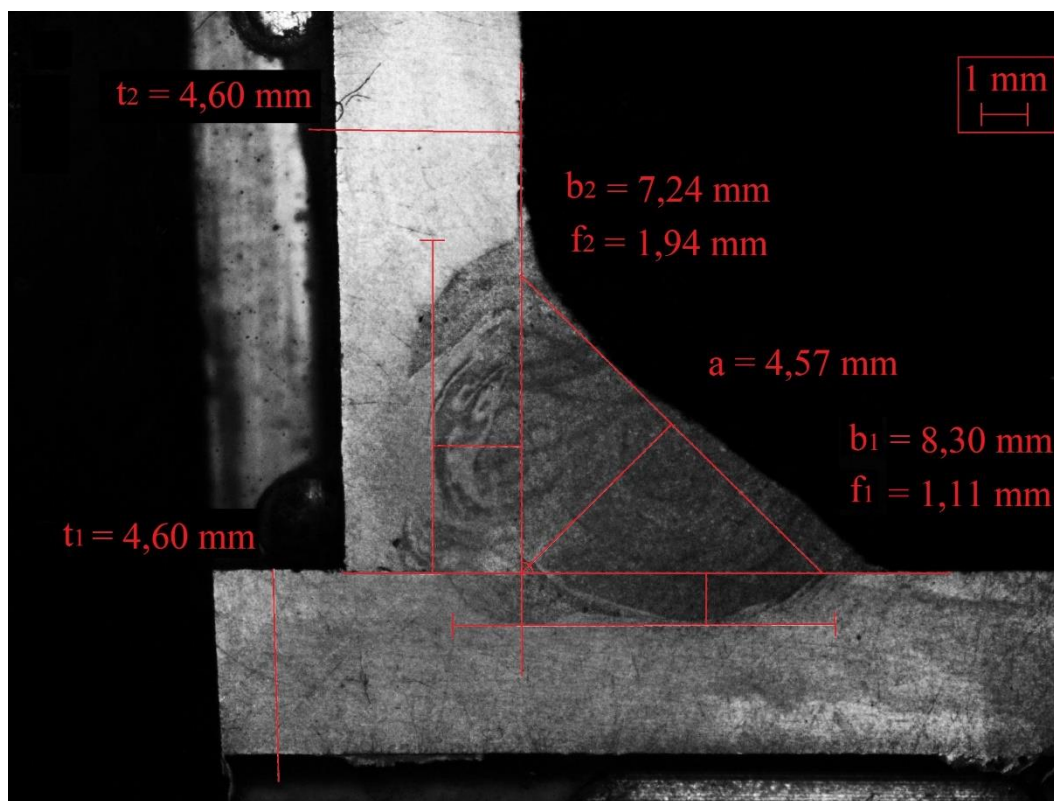
název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{\min} \geq 3,84$	$b_1 = 7,69 \text{ mm}$	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{\min} \geq 3,84$	$b_2 = 7,19 \text{ mm}$	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 3,93 \geq 0,79$	$f_1 = 1,34 \text{ mm}$	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 3,84 \geq 0,77$	$f_2 = 3,45 \text{ mm}$	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min} \geq 0,7 \cdot 3,84 \geq 2,69$	$a = 4,50 \text{ mm}$	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 4,50 \leq 0,90$	$p_{\max} = 0,17 \text{ mm}$	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK



Metalografický výbrus spoje P6-2 v řezu 2E.

Tab. TP6-2E Srovnání kvality spoje P6-2 v řezu 2E s požadovanými podmínkami.

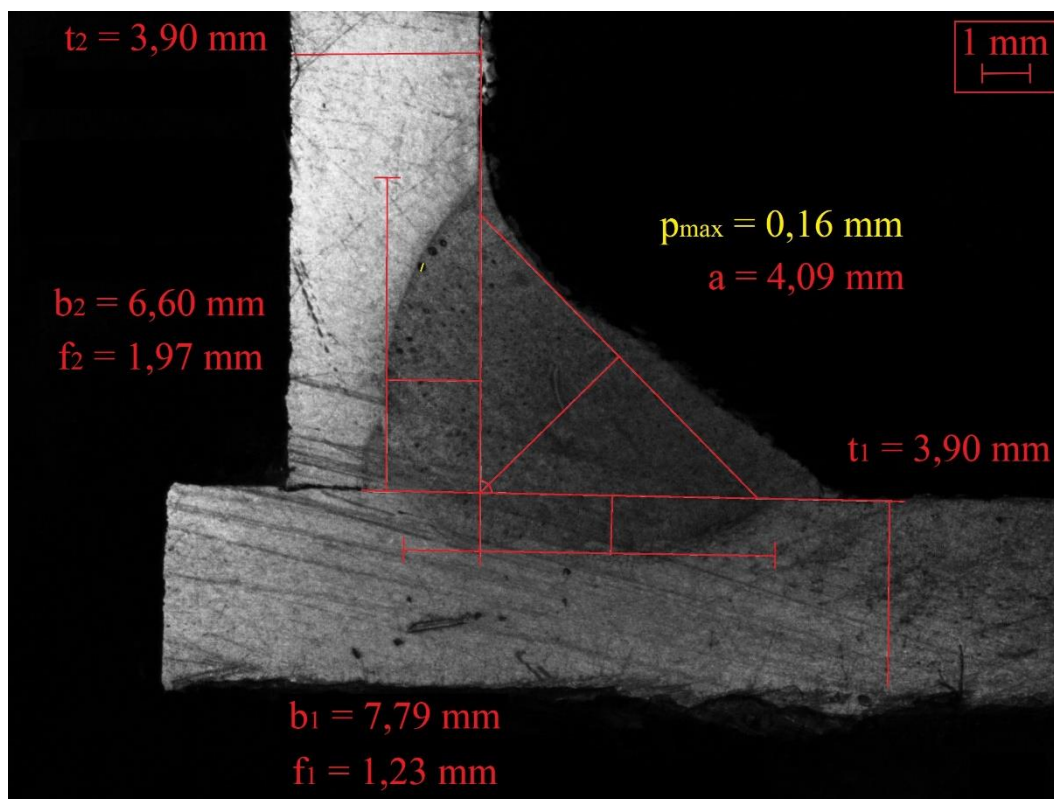
název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{\min} \geq 5,30$	$b_1 = 7,33 \text{ mm}$	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{\min} \geq 5,30$	$b_2 = 7,38 \text{ mm}$	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 5,30 \geq 1,06$	$f_1 = 1,15 \text{ mm}$	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 5,30 \geq 1,06$	$f_2 = 2,03 \text{ mm}$	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min} \geq 0,7 \cdot 5,30 \geq 3,71$	$a = 5,02 \text{ mm}$	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 5,02 \leq 1,00$	$p_{\max} = 0 \text{ mm}$	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK



Metalografický výbrus spoje P6-2 v řezu 2F.

Tab. TP6-2F Srovnání kvality spoje P6-2 v řezu 2F s požadovanými podmínkami.

název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{\min} \geq 4,60$	$b_1 = 8,30$ mm	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{\min} \geq 4,60$	$b_2 = 7,24$ mm	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 4,60 \geq 0,92$	$f_1 = 1,11$ mm	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 4,60 \geq 0,92$	$f_2 = 1,94$ mm	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min} \geq 0,7 \cdot 4,60 \geq 3,22$	$a = 4,57$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 4,57 \leq 1,08$	$p_{\max} = 0$ mm	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK



Metalografický výbrus spoje P6-2 v řezu 2G.

Tab. TP6-2G Srovnání kvality spoje P6-2 v řezu 2G s požadovanými podmínkami.

název	pravidlo	naměřená hodnota	OK/NOK
šířka 1. průvaru [mm]	$b_1 \geq t_{\min} \geq 3,90$	$b_1 = 7,79$ mm	OK
šířka 2. průvaru [mm]	$b_2 \geq t_{\min} \geq 3,90$	$b_2 = 6,60$ mm	OK
hloubka 1. průvaru [mm]	$f_1 \geq 0,2 \cdot t_1 \geq 0,2 \cdot 3,90 \geq 0,78$	$f_1 = 1,23$ mm	OK
hloubka 2. průvaru [mm]	$f_2 \geq 0,2 \cdot t_2 \geq 0,2 \cdot 3,90 \geq 0,78$	$f_2 = 1,97$ mm	OK
šířka svaru [mm]	$a \geq 0,7 \cdot t_{\min} \geq 0,7 \cdot 3,90 \geq 2,73$	$a = 4,09$ mm	OK
max. velikost póru [mm]	$p_{\max} \leq 0,2 \cdot a \leq 0,2 \cdot 4,09 \leq 0,82$	$p_{\max} = 0,16$ mm	OK
pórovitost [%]	max 1 %	< 1 %	OK
trhlina	X	X	OK